

ORCHESTRATEUR

Physik - Modelle verstehen, Probleme lösen und Ergebnisse erörtern

Ein vertiefender Leitfaden, offline verfügbar

Lesen, verstehen, ein Kapitel wiederfinden

LAFAYETTE DIGITAL PRODUCTS

Inhalt

Die Einträge des Inhaltsverzeichnisses sind anklickbar. PDF-Lesezeichen führen zu Kapiteln und Abschnitten. Der Link am Ende jeder Seite führt hierher zurück.

Kapitel 1 - Messen, modellieren und Unsicherheiten erörtern 8

Kapitel 2 - Kinematik: Bewegung beschreiben, ohne ihre Größen zu verwechseln 18

Kapitel 3 - Dynamik: die Kräftebilanz mit einer Beschleunigung verbinden 29

Kapitel 4 - Energie und Arbeit: eine Grenze wählen und Übertragungen verfolgen 40

Kapitel 5 - Gravitation und Umlaufbahnen: eine fortgesetzte Fallbewegung verstehen 52

Kapitel 6 - Fluide: Druck, Volumenstrom und Grenzen der Strömungsmodelle 63

Kapitel 7 - Elektrizität: Ladung, Energie und zeitliche Entwicklung eines RC-Kreises 73

Kapitel 8 - Thermodynamik: einen Zustand von den ihn verändernden Übertragungen unterscheiden 85

Kapitel 9 - Wellen: Ausbreitung, Frequenz, Intensität und Dopplerverschiebung 98

Kapitel 10 - Optik: Beugung, Interferenz, Bilder und Fernrohre 108

Kapitel 11 - Photonen, Energieniveaus und Umwandlung von Licht 120

Kapitel 12 - Eine physikalische Lösung aufbauen, prüfen und darstellen 133

Anhänge - Themenübergreifende Aufgaben und begründete Antworten 145

Physik - Modelle verstehen, Probleme lösen und Ergebnisse erörtern

Ein ausführlicher Leitfaden für aktives Lernen

Dieser Leitfaden vertieft die Physik auf dem Niveau des Schwerpunktfachs in der französischen Abschlussklasse Terminale générale und greift die notwendigen Grundlagen auf. Er behandelt nicht die gesamte Chemie des Fachs Physik-Chemie und ist keine amtliche Liste von Prüfungsthemen. Institutionelle Quellen geben einen Rahmen vor; Erklärungen, fiktive Situationen, Herleitungen und Aufgaben sind eigenständige Texte von LFDP. Codex, der KI-Assistent von OpenAI, hat an der Ausarbeitung und der deutschen Übersetzung mitgewirkt. Die französische Fassung wurde unabhängig gelesen und korrigiert. Die wenigen Ergänzungen über die zentralen Lernziele hinaus sind im Text als solche gekennzeichnet.

Ziel ist, von einer Situation zu einem Modell, vom Modell zu Beziehungen und von diesen Beziehungen zu einer begründbaren Schlussfolgerung zu gelangen. Ein korrekter Zahlenwert ohne klare Annahmen kann die falsche Frage beantworten. Eine Erklärung ohne Rechnung kann zu unbestimmt bleiben, wenn die Daten eine Abschätzung erlauben. Deshalb verbinden die Kapitel Gedanken, Argumente, Veranschaulichungen und Kontrollen: Formeln sollen weder isolierte Rezepte noch ein Hindernis für das Verständnis sein.

Die Beispiele für Körper, Quellen und Geräte dienen dem Lernen. Sie beschreiben keine garantierte Leistung eines Produkts, geben keine Bauanleitung vor und ersetzen keine betreute Versuchsanweisung. Gerundete Werte von g, fiktive Materialien und Vereinfachungen werden angegeben. Bei einem wirklichen

Experiment bleiben die Vorgaben der Einrichtung, die Betreuung und die Eigenschaften des Geräts unverzichtbar.

Aufbau und Wege durch den Text

Das erste Kapitel führt Größen, Einheiten und Messungen ein. Die Kapitel zwei bis fünf vertiefen Bewegung, Wechselwirkungen, Energie und Gravitation. Das sechste behandelt Fluide, das siebte elektrische Schaltungen und die zeitliche Entwicklung eines RC-Kreises, das achte die Thermodynamik. Die Kapitel neun bis elf verbinden Wellen, Optik und Photonen. Das letzte bündelt Methoden zum Lösen und Erörtern physikalischer Probleme. Die Anhänge enthalten zusätzliche Aufgaben mit erläuterten Lösungen und Unterscheidungen, die mehrere Themen verbinden.

Bei der ersten Lektüre empfiehlt sich diese Reihenfolge, weil die Überlegungen zu Bewegung und Energie später wiederkehren. Zur gezielten Wiederholung beginnen Sie bei einer Frage, die Sie noch nicht bearbeiten können, und gehen dann zur Definition oder zum Modell zurück, von denen ihre Antwort abhängt. Jedes Kapitel besteht aus kurzen Abschnitten, damit eine Erklärung auf einem Telefon oder im Ausdruck schnell wiederzufinden ist. Diese Gliederung des Dokuments garantiert nicht die Funktion eines bestimmten Leseprogramms.

Eine Lerneinheit kann drei Schritte umfassen: einen Abschnitt lesen, ohne alles sofort auswendig lernen zu wollen; den Text schließen und den Gedanken in wenigen Sätzen erklären; eine Aufgabe lösen und dabei die Annahmen nennen, bevor Sie die Lösung vergleichen. Weicht Ihre Antwort ab, suchen Sie zuerst die Stelle, an der sich die Gedankengänge trennen. Nur das Endergebnis zu ändern, macht aus einem Fehler noch keinen Lernfortschritt.

Konventionen und Umgang mit den Lösungen

Die Gleichungen verwenden Symbole, die im jeweiligen Zusammenhang definiert werden. Das Vorzeichen einer Kraft, einer Geschwindigkeit oder eines Energieaustauschs hängt von der angegebenen Konvention ab. Derselbe Buchstabe kann in zwei Kapiteln unterschiedliche Größen bezeichnen; maßgeblich ist die örtliche Definition. Zehnerpotenzen und Vorsätze müssen vor dem Einsetzen der Zahlen umgerechnet werden. Der Mittelpunkt in einer Einheit wie J·s bezeichnet ein Produkt; ein negativer Exponent bezeichnet einen Kehrwert.

Eine Lösung zeigt einen möglichen Weg und ist nicht die einzige zulässige Darstellung. Andere Wege können gleichwertig sein, wenn sie stimmige Annahmen verwenden und dieselbe Frage beantworten. Zwei nahe beieinanderliegende Zahlenwerte beweisen hingegen noch nicht die Gleichwertigkeit zweier Modelle. Dimensions-, Vorzeichen- und Größenordnungskontrollen sowie die Prüfung der Anfangsbedingungen müssen die Rechnung begleiten.

Dieses Dokument dient dem Lernen und ist offline nutzbar. Es liefert weder Warnungen noch Diagnosen noch die Validierung eines realen Geräts. Umfang, Quellenverzeichnis und Wortzählung sind Angaben zur Nachvollziehbarkeit; sie stellen keine schulische oder technische Zertifizierung dar.

Herkunft und Mitarbeit

LAFAYETTE DIGITAL PRODUCTS. Codex (OpenAI) hat an der eigenständigen Ausarbeitung und der vollständigen deutschen Übersetzung mitgewirkt. Diese Fassung bewahrt den Inhalt der korrigierten französischen Vorlage anhand ihrer vollständigen englischen Referenzfassung; sie ist keine gekürzte Zusammenfassung. Die französische Fassung wurde unabhängig redaktionell gelesen. Die redaktionelle Prüfung ist keine fachliche Zertifizierung. Historische Quellenangaben bezeichnen die für die französische Fassung dokumentierte Recherche, keine neu durchgeführte vollständige Prüfung sämtlicher Primärquellen.

Der Bezug zur französischen Terminale bezeichnet den didaktischen Rahmen, keine amtliche Anerkennung und keine Zusicherung einer Prüfungsnote. Fiktive Beispiele bleiben Lernmodelle und liefern weder die Validierung realer Geräte noch medizinische oder sicherheitstechnische Handlungsanweisungen.

Kapitel 1 - Messen, modellieren und Unsicherheiten erörtern

Lernziele: eine Größe von ihrer Einheit unterscheiden, ein System und ein Modell wählen, eine Messung lesen und eine Grenze erklären. Spätere Kapitel vertiefen die Mechanismen, die diese ersten Situationen einführen.

Historischer Bezug - 1960: ein gemeinsames Maßsystem benennen

Im Jahr 1960 gab die elfte Generalkonferenz für Maß und Gewicht dem System auf Grundlage der damals angenommenen Basiseinheiten den Namen Internationales Einheitensystem und die Abkürzung SI. Dieser institutionelle Bezug zeigt: Eine Einheit ist keine persönliche Vorliebe, sondern gehört zu einer gemeinsamen Ordnung des Messens. Die Dimensionsüberlegungen dieses Kapitels nutzen diese Stimmigkeit; sie hängen nicht vom Land ab, in dem ein Ergebnis niedergeschrieben wird. Eine gemeinsame Sprache beseitigt jedoch weder die Unsicherheit einer einzelnen Messung noch die Grenzen des verwendeten Modells.

Quelle des historischen Sachverhalts, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: BIPM, Resolution 12 der 11. CGPM, 1960, https://www.bipm.org/fr/committees/cg/cgpm/11-1960/resolution-12. Eigenständige didaktische Einordnung von LFDP, ohne wörtliches Zitat oder übernommene Abbildung.

1. Mit einer überprüfbaren Frage beginnen

„Dieser Körper bewegt sich schnell“ beschreibt einen Eindruck; „seine Position nimmt in diesem Bezugssystem innerhalb einer Sekunde um zwei Meter zu“ beschreibt ein überprüfbares Ergebnis. Physik beginnt deshalb nicht mit der Wahl einer Formel, sondern mit der Festlegung des untersuchten Systems, der gesuchten Größe und der Beobachtungsbedingungen. Wer einen Wagen untersucht, muss entscheiden, ob seine Ladung dazugehört, einen Positionsursprung festlegen und erklären, wie die Zeit gemessen wird.

Experiment und Modell erfüllen unterschiedliche Aufgaben. Ein Experiment liefert Beobachtungen unter bestimmten Bedingungen; ein Modell ordnet Beziehungen, die diese erklären oder andere Ergebnisse vorhersagen. Ein Massepunktmodell kann für die Verschiebung eines Wagens nützlich sein, ohne die Drehung seiner Räder zu beschreiben. Diese Vereinfachung ist kein Fehler, wenn sie genannt wird und zur Frage passt. Sie wird irreführend, sobald sie erklären soll, was sie bewusst ausgeklammert hat.

Schreiben Sie zur Vorbereitung einer Lösung vier Zeilen: System, Bezugssystem, Annahmen, gesuchte Größe. Oft verhindern sie mehr Fehler als eine lange Formelsammlung. Ist eine Energie gesucht, beantwortet die alleinige Bestimmung einer Geschwindigkeit die Frage noch nicht.

2. Eine Größe ist weder ihr Zahlenwert noch ihre Einheit

Eine Länge von 1,20 m und eine Länge von 120 cm sind gleich. Der Zahlenwert ändert sich mit der Einheit, die Größe dagegen bleibt dieselbe. Das Internationale Einheitensystem verbindet Messungen; Meter, Sekunde und Kilogramm dienen hier als Bezugseinheiten. Unterscheiden Sie die Masse in Kilogramm von der Gewichtskraft, einer Kraft in Newton.

Dimensionen ermöglichen eine Kontrolle unabhängig von der Zahlenrechnung. In einer Beziehung Abstand = Geschwindigkeitsbetrag × Dauer ergibt das Produkt (m/s) × s tatsächlich Meter. Ein Ausdruck, der eine Länge und eine Zeit addiert, hat in diesem Rahmen keinen Sinn. Ein Ausdruck kann allerdings die richtigen Dimensionen besitzen und dennoch physikalisch falsch sein: Die Dimensionsanalyse schließt Fehler aus, beweist aber kein Gesetz.

Rechnen Sie 72 km/h um: 72 × 1000 / 3600 = 20 m/s. Wer diese Umrechnung vor einer Berechnung der kinetischen Energie vergisst, vergrößert den Fehler, weil die Geschwindigkeit quadriert wird. Behalten Sie die Einheiten in den Zwischenschritten bei: Sie zeigen, wo die Rechnung ihren Charakter verändert hat.

3. Messung, Streuung und Unsicherheit

Eine Anzeige von 1,20 m bedeutet nicht, dass die Länge exakt bekannt ist. Geräteauflösung, Wahl der Anfangs- und Endpunkte, Kalibrierung und Ablesung können eine Rolle spielen. Wiederholte Messungen informieren über die Streuung; sie zeigen nicht automatisch einen Fehler, der alle Messungen gleichermaßen verschiebt. Ein Gerät mit einem konstanten Versatz kann sehr ähnliche Ergebnisse liefern, die trotzdem alle vom richtigen Wert abweichen.

Angenommen, zwei Ergebnisse lauten 1,20 m und 1,21 m. Ohne Angaben zu ihren Unsicherheiten lässt sich daraus nicht schließen, dass die Körper unterschiedliche Längen haben. Gibt die Aufgabe Vergleichsspielräume von 0,02 m vor, überlappen die Bereiche plausibler Werte. Das mahnt zur Vorsicht, beweist aber ebenso wenig die exakte Gleichheit der Größen. Ein anschaulicher Spielraum darf ohne eine begründete Methode nicht in ein statistisches Konfidenzintervall umgedeutet werden.

Die Genauigkeit der angegebenen Stellen sollte zu jener der Daten passen. Eine Beschleunigung mit zehn Nachkommastellen aufzuschreiben, weil der Rechner sie anzeigt, schafft keine Information mit zehn Nachkommastellen. Behalten Sie während der Rechnung genügend Stellen bei und runden Sie die Endantwort anschließend mit einer Erklärung der gewählten Genauigkeit.

4. Bewegung beschreiben, bevor man ihre Ursache sucht

Die Position hängt vom Bezugssystem ab. Eine im Zug sitzende Person ruht relativ zum Sitz und bewegt sich relativ zum Bahnsteig. Ein erdfestes Bezugssystem ist für eine Aufgabe nahe dem Boden oft praktisch; es als Inertialsystem zu behandeln bleibt eine Näherung, die nach Maßstab und geforderter Genauigkeit beurteilt werden muss.

Bei einer geradlinigen Bewegung ist die mittlere Geschwindigkeit die Ortsänderung geteilt durch die Dauer: v_moy = Δx / Δt. Die Ortsänderung besitzt eine Richtung und ist nicht die insgesamt zurückgelegte Strecke. Bei einer Hin- und Rückbewegung kann sie null sein, obwohl die Strecke nicht null ist. Die momentane Geschwindigkeit ist die Ableitung der Position: v(t) = x'(t). Die Beschleunigung beschreibt die Änderung der Geschwindigkeit: a(t) = v'(t).

Betrachten wir x(t) = 0,40 t² + 0,20 t, mit x in Metern und t in Sekunden. Die Koeffizienten tragen die erforderlichen Einheiten. Es folgt v(t) = 0,80 t + 0,20 und dann a(t) = 0,80 m/s². Bei t = 2 s sind x = 2,00 m und v = 1,80 m/s. Konstante Beschleunigung bedeutet nicht konstante Geschwindigkeit, sondern eine gleichmäßige zeitliche Änderung der Geschwindigkeit.

5. Eine Kräftebilanz gehört zu einem System

Für ein System mit konstanter Masse in einem Inertialsystem lautet Newtons zweites Gesetz als Vektorbeziehung: Summe der äußeren Kräfte = m × a. Projizieren Sie diese Beziehung mit einheitlichen Vorzeichen auf die gewählte Achse. Addiert werden die Kräfte auf das System, nicht die Kräfte, die es auf seine Umgebung ausübt.

Ein Wagen mit der Masse 2,0 kg erfährt eine horizontale Zugkraft von 3,0 N und eine entgegenwirkende Reibungskraft von 1,0 N. Die horizontale Resultierende beträgt 2,0 N; die Beschleunigung ist folglich 1,0 m/s² in Zugrichtung. Wären Zugkraft und Reibung gleich groß, wäre die Beschleunigung null. Der Wagen könnte sich trotzdem mit konstanter Geschwindigkeit weiterbewegen. „Er bewegt sich vorwärts, also ist die Resultierende positiv“ ist ein falscher Schluss.

Die wechselseitigen Kräfte einer Wechselwirkung greifen an zwei verschiedenen Systemen an. Sie heben sich nicht in der Kräftebilanz eines einzelnen dieser Systeme auf. Ebenso können sich Gewichtskraft und Normalkraft des Bodens in einer bestimmten Situation ausgleichen, ohne ein Paar aus Kraft und Gegenkraft zu sein: Ihre Wechselwirkungspartner sind nicht dieselben.

6. Mit der Energie einen anderen Lösungsweg wählen

Die Dynamik verbindet Kräfte und Beschleunigung; ein Energieansatz kann ersparen, jeden einzelnen Zeitpunkt der Bewegung zu beschreiben. Für einen Körper der Masse m mit dem Geschwindigkeitsbetrag v ist die kinetische Energie E_c = (1/2) m v². In einem als gleichförmig angenommenen Schwerefeld lässt sich eine potenzielle Energie E_p = m g h schreiben, wobei ein Höhenursprung gewählt wird.

Die Erhaltung der mechanischen Energie verlangt passende Annahmen. Bei Reibung kann die mechanische Energie abnehmen, während die Gesamtenergie einschließlich aller Austausche weiterhin bilanziert wird. Die Umwandlung in innere Energie ist kein Verschwinden von Energie. Geben Sie die Systemgrenze und die sie überschreitenden Übertragungen an.

Bei einem Körper von 2,0 kg, dessen Geschwindigkeitsbetrag von 5,0 auf 10,0 m/s steigt, wächst die kinetische Energie von 25 auf 100 J. Eine Verdopplung der Geschwindigkeit vervierfacht diese Energie im Modell. Daraus lässt sich ohne Kenntnis der Kräfte, der Haftung und der Bewegungsbedingungen kein realer Bremsweg vorhersagen.

7. Leistung ist kein Energievorrat

Die mittlere Leistung ist die pro Zeit übertragene Energie: P_moy = E / Δt. Ein Watt ist ein Joule pro Sekunde. Eine Lampe, die bei einer konstanten Leistung von 5 W zwei Stunden betrieben wird, erhält 10 Wh oder 36 000 J. Energie in Wh und Leistung in W sind also nicht austauschbar.

Eine Batterie mit einem Nennwert von 20 Wh könnte diese Lampe in einem idealen verlustfreien Modell vier Stunden versorgen. Eine wirkliche Rechnung muss Wirkungsgrad, Temperatur, Betriebsgrenzen und tatsächlich nutzbare Energie berücksichtigen. Der Idealwert liefert eine Größenordnung, keine zugesagte Betriebsdauer. Für das Verständnis dieser Überlegung muss keine Batterie zusammengebaut werden.

8. Zwei Modelle erörtern, ohne einen wissenschaftlichen Streit zu erfinden

Man kann ein reibungsfreies Modell mit einem Modell vergleichen, das Reibung berücksichtigt. Das erste vereinfacht die Rechnung und beschreibt eine kurze Phase manchmal ausreichend; das zweite kann einen längeren Verlauf besser wiedergeben. Die Frage ist nicht, welches immer „wahr“ ist, sondern welches die Frage mit einer vertretbaren Näherung beantwortet.

Eine Abweichung zwischen Messung und Vorhersage verlangt mehrere Kontrollen: Rechnung, Einheiten, Verfahren, Unsicherheit und Annahmen. Sie beweist nicht sofort, dass das untersuchte Gesetz falsch ist. Umgekehrt verliert ein Modell seine Erklärungskraft, wenn man es durch immer neue, nicht überprüfbare Annahmen rettet. Eine hilfreiche Erklärung nennt die Bedingungen, unter denen sie scheitern könnte.

9. Aufgaben mit Lösungen

Aufgabe A - Vorzeichen. Ein Körper bewegt sich mit 4 m/s in positiver x-Richtung. Seine Geschwindigkeit beträgt 1 m/s nach 3 s. Berechnen Sie die mittlere Beschleunigung. **Lösung:** $(1 - 4)/3 = -1$ m/s². Das Vorzeichen beschreibt die Richtung der Geschwindigkeitsänderung; es bedeutet nicht, dass sich der Körper bereits in negativer x-Richtung bewegt. Seine Endgeschwindigkeit bleibt positiv.

Aufgabe B - Energie. Ein Körper von 0,50 kg bewegt sich mit 6,0 m/s. Wie groß ist seine kinetische Energie? **Lösung:** $E_c = 0{,}5 \times 0{,}50 \times 6{,}0^2 = 9{,}0$ J. Die beiden Faktoren 0,5 und 0,50 sind der Formelkoeffizient beziehungsweise die Masse: Sie zu verwechseln ist ein häufiger Fehler.

Aufgabe C - Modell. Eine Lampe von 4 W wird drei Stunden betrieben. Eine Batterie hat den Nennwert 15 Wh; davon werden

80 % als nutzbar angenommen. **Lösung:** benötigte Energie = 12 Wh; nutzbare Energie = 0,80 × 15 = 12 Wh. Das Modell ergibt genau die benötigte Menge ohne Reserve. Es begründet daher keine garantierte Betriebsdauer unter realen Bedingungen.

10. Aktiv wiederholen

Definieren Sie ohne Blick auf den Text Größe, Einheit, Bezugssystem und Resultierende. Erklären Sie dann, warum eine Geschwindigkeit ungleich null mit einer Beschleunigung von null einhergehen kann und warum mechanische Energie abnehmen kann, ohne dass Gesamtenergie verschwindet. Wiederholen Sie eine Rechnung mit Einheiten und benennen Sie eine Annahme, die ihre Reichweite begrenzt.

Nennen Sie in einer mündlichen Antwort einen Gedanken, eine Rechnung oder ein Beispiel und anschließend eine Grenze. Schließen Sie schriftlich mit einer Antwort in den Begriffen der Ausgangsfrage. Ein isolierter Zahlenwert zeigt weder, was untersucht wurde, noch, warum die Rechnung geeignet ist.

11. Ein Modell aus einem Diagramm auswählen

Eine Messwerttabelle bringt ihre Gleichung nicht mit. Prüfen Sie zunächst, was der Ursprung bedeutet, bevor Sie eine Beziehung als proportional beurteilen. Wird die Dehnung x gegenüber der unbelasteten Federlänge gemessen, verläuft F = kx im linear-elastischen Modell durch den Ursprung. Bei einem konstanten Geräteversatz können die Daten dagegen F = kx + b folgen. Der Term b ist nicht automatisch eine neue Federeigenschaft: Er kann einen Nullpunktfehler oder eine bereits vorhandene Kraft beschreiben. Diese Unterscheidung ist am Verfahren zu prüfen und nicht allein deshalb zu treffen, weil eine Gerade ansprechend aussieht.

Betrachten wir folgende fiktive Punkte: x beträgt 0,010; 0,020; 0,030 m, und F jeweils 0,23; 0,43; 0,63 N. Zwischen aufeinanderfolgenden Punkten ändert sich die Kraft um 0,20 N bei einer Dehnungsänderung von 0,010 m. Die Steigung beträgt daher 20 N/m. Die affine Beziehung durch diese Punkte ist F = 20x + 0,03. Die Steigung als Federkonstante zu deuten verlangt eine klar definierte Dehnung und einen passenden linearen Bereich. Den Achsenabschnitt als Gerätefehler zu deuten verlangt eine zusätzliche Kontrolle. Die Rechnung unterscheidet zwei Parameter; sie entscheidet nicht allein über ihre Ursachen.

Um F = kv² zu prüfen, kann ein Diagramm von F gegen v² die Struktur deutlicher machen als eines von F gegen v. Die Umformung der Achsen stellt eine Frage an die Daten. Sie erspart weder die Einheitenkontrolle noch die Prüfung des Bereichs, in dem die Annahme gilt. Eine über einen kleinen Bereich angepasste Beziehung zu extrapolieren kann eine numerisch sehr genaue, physikalisch jedoch sehr unsichere Vorhersage liefern.

12. Eine differentielle Abschätzung der Unsicherheit

Angenommen, die Geschwindigkeit wird mit v = d/t aus unabhängigen Messungen von Strecke und Dauer berechnet. Bei kleinen relativen Unsicherheiten und einem geeigneten linearisierten Modell ergibt eine übliche Abschätzung der kombinierten Standardunsicherheit u(v)/v = sqrt[(u(d)/d)² + (u(t)/t)²]. Diese Beziehung kombiniert Standardunsicherheiten; sie addiert keine garantierten maximalen Spielräume. Eine Korrelation der Messungen würde die Rechnung verändern. Vor dem Einsetzen muss deshalb bekannt sein, welche Bedeutung die verwendeten Zahlen haben.

Bei d = 2,00 m, u(d) = 0,01 m, t = 1,00 s und u(t) = 0,02 s beträgt die berechnete Geschwindigkeit 2,00 m/s. Die relativen Beiträge sind 0,005 und 0,020. Ihre quadratische Kombination beträgt etwa

0,0206; die Standardunsicherheit der Geschwindigkeit liegt daher bei etwa 0,041 m/s. In diesem Beispiel würde eine Verbesserung allein der Streckenmessung die gesamte Unsicherheit wenig ändern: Die Dauer dominiert. Diese Schlussfolgerung lenkt eine konkrete Verbesserung des Experiments statt bloß die Anzahl der Nachkommastellen zu erhöhen.

Ein einfacherer Ansatz kann vorgegebene Grenzen verwenden: Liegt d in [1,99; 2,01] m und t in [0,98; 1,02] s, dann liegt d/t in [1,99/1,02; 2,01/0,98], also ungefähr in [1,951; 2,051] m/s. Diese zweite Rechnung beantwortet eine andere Frage mit anderen Annahmen. Beide Wege als identisch darzustellen würde ihre jeweilige Information verlieren. Die angestrebte Fähigkeit ist, die Methode auszuwählen und zu benennen und anschließend zu beurteilen, welche Messung verbessert werden sollte.

Kapitel 2 - Kinematik: Bewegung beschreiben, ohne ihre Größen zu verwechseln

Historischer Bezug - 1638: zwei Bewegungen zusammensetzen

Galileis Discorsi, 1638 in Leiden veröffentlicht, behandeln unter anderem die parabelförmige Bewegung von Geschossen. Das Museo Galileo verbindet dieses Ergebnis mit der Überlagerung einer horizontalen Bewegung und einer gleichmäßig beschleunigten Fallbewegung. Dieser historische Bezug erläutert die Trennung der Gleichungen entlang zweier Achsen in diesem Kapitel. Die gezeichnete Form einer Parabel beweist nicht, dass jeder reale Körper exakt dieser Bahn folgt: Luftwiderstand und Anfangsbedingungen müssen stets erörtert werden. Die Geschichte einer Idee hilft zu verstehen, warum eine Herleitung ihre Annahmen angeben muss.

Quelle des historischen Sachverhalts, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: Museo Galileo, Katalogeintrag zum Gerät für die Demonstration einer parabelförmigen Flugbahn, https://catalogue.museogalileo.it/object/ApparatusToDemonstrateParabolicTrajectoryProjectiles.html. Eigenständige didaktische Einordnung von LFDP, ohne wörtliches Zitat oder übernommene Abbildung.

1. Die Frage und die notwendigen Festlegungen

Die Kinematik beschreibt, wo sich ein System befindet und wie sich seine Position verändert. Sie sucht noch nicht nach der verantwortlichen Kraft. Diese Trennung ist ergiebig: Die Beobachtung einer Bahn ermöglicht eine dynamische Fragestellung, aber die Bahn allein zeigt nicht jede Wechselwirkung. Ein Ball, der in einem Video eine Parabel beschreibt, beweist nicht allein durch diese Form, dass Reibung vernachlässigbar ist. Diese Annahme muss zu den Bedingungen und zur Genauigkeit der Daten passen.

Benennen Sie vor der Rechnung System, Bezugssystem, räumliches Koordinatensystem und Zeitursprung. Das System kann ein Körper sein, dessen Schwerpunkt untersucht wird: eine nützliche Näherung, wenn die Drehung nicht Gegenstand der Frage ist. Das Bezugssystem ist der physikalische Rahmen, relativ zu dem die Bewegung beschrieben wird. Das Koordinatensystem stellt Achsen, Ursprung und Koordinaten bereit. Der Zeitursprung legt fest, was $t = 0$ bedeutet: Beginn einer Aufnahme, Abwurf oder Passage einer Markierung. Das sind keine Darstellungsdetails; sie bestimmen die Bedeutung der Größen.

Ein gleichmäßig fahrender Zug veranschaulicht die Abhängigkeit vom Bezugssystem. Ein sitzender Fahrgast hat im Koordinatensystem des Wagens eine konstante Position. In dem des Bahnsteigs ändert sie sich. Zwei verschiedene Beschreibungen können richtig sein, weil sie unterschiedliche Fragen beantworten. Hier wird meist ein erdfestes Bezugssystem verwendet; seine näherungsweise Behandlung als Inertialsystem wird im Kapitel über Kräfte besprochen. Zunächst werden alle Koordinaten in einem festen orthonormalen Koordinatensystem und die Zeiten in Sekunden ausgedrückt.

2. Position, Bahn und Ortsänderung

In zwei Dimensionen lautet der Ortsvektor OM(t) = x(t) e_x + y(t) e_y. Die Vektoren e_x und e_y geben die Achsenrichtungen an. Die Bahn ist die Menge der eingenommenen Positionen; die Zeit-Orts-Funktionen geben zusätzlich an, wann diese Positionen erreicht werden. Zwei Körper können dieselbe Kurve mit unterschiedlichem zeitlichem Verlauf durchlaufen. Ein Foto dieser Kurve allein bestimmt deshalb noch keine Geschwindigkeit.

Die Ortsänderung zwischen zwei Zeitpunkten ist die Differenz der Ortsvektoren. Sie hängt von den Endpunkten des Wegs ab, während die zurückgelegte Strecke vom gesamten Weg abhängt. Eine Person geht 60 m nach Osten und dann 40 m nach Westen. Die Gesamtstrecke beträgt 100 m, die Ortsänderung 20 m nach Osten. Dauert der Weg 50 s, beträgt die mittlere Geschwindigkeit 0,40 m/s nach Osten, während Strecke geteilt durch Dauer 2,0 m/s ergibt. Geben Sie die jeweils verwendete Bedeutung an, um Mehrdeutigkeit zu vermeiden.

Eine geradlinige Bewegung verläuft auf einer Geraden, kann aber einen Richtungswechsel enthalten. Eine Koordinate x(t), die zunächst zunimmt und danach abnimmt, beschreibt diesen Wechsel, ohne dass sich die Achse bewegen müsste. Eine Kreisbewegung ist durch eine kreisförmige Bahn definiert und kann gleichförmig oder ungleichförmig sein. „Gleichförmig“ bezeichnet hier einen konstanten Geschwindigkeitsbetrag. Die Begriffe verbinden somit eine geometrische Bahneigenschaft mit einer zeitabhängigen Eigenschaft, die getrennt zu untersuchen ist.

3. Geschwindigkeit als Änderung der Position

Die mittlere Geschwindigkeit zwischen t und t + Δt ist ΔOM/Δt. Die momentane Geschwindigkeit ist bei differenzierbarer Position der Grenzwert dieses Quotienten für Δt gegen null. Wir schreiben v = dOM/dt, also v_x = dx/dt und v_y = dy/dt. Ihr Betrag ist sqrt(v_x² + v_y²) in unserem Koordinatensystem. Ihre Einheit ist Meter pro Sekunde. Der Geschwindigkeitsvektor liegt tangential zur Bahn und zeigt bei einem Betrag ungleich null in Bewegungsrichtung.

Diese Definition verbindet Diagramm und Rechnung. In einem Diagramm von x gegen t gibt die Sekantensteigung eine mittlere Geschwindigkeit an. Die Tangentensteigung gibt v_x zu einem bestimmten Zeitpunkt an. Eine negative Steigung bedeutet eine abnehmende Koordinate, nicht einen negativen Geschwindigkeitsbetrag. In einem Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm liefert eine vorzeichenbehaftete Fläche eine Ortsänderung, jedoch ohne Anfangsbedingung keine absolute Position.

Betrachten wir x(t) = 3 + 2t − 0,50t² mit passenden Einheiten. Dann ist v_x(t) = 2 − t. Bei t = 1 s bewegt sich der Körper in positiver Richtung; bei t = 2 s ist seine Geschwindigkeit null; bei t = 3 s bewegt er sich in negativer Richtung. Seine Koordinate bei t = 2 s ist 5 m. Die Geschwindigkeit null in diesem Augenblick löscht weder seine Position noch den späteren Verlauf. Sie kennzeichnet hier eine Umkehr, die durch den Vorzeichenwechsel von v_x um diesen Zeitpunkt nachgewiesen wird.

4. Beschleunigung beschreibt eine Vektoränderung

Die Beschleunigung ist a = dv/dt. Ihre Komponenten sind die Ableitungen der Geschwindigkeitskomponenten; ihre Einheit ist m/s². Sie kann den Betrag, die Richtung der Geschwindigkeit oder beides ändern. Im vorigen Beispiel ist a_x = −1 m/s². Vor der Umkehr zeigen Geschwindigkeit und Beschleunigung in entgegengesetzte Richtungen: Der Geschwindigkeitsbetrag nimmt ab. Danach zeigen sie in dieselbe Richtung: Der Betrag nimmt zu. Dieselbe negative Beschleunigung entspricht also zwei unterschiedlichen Änderungen des Geschwindigkeitsbetrags.

Bei geradliniger Bewegung ist der Vergleich der Vorzeichen von v_x und a_x hilfreich. Ein positives Produkt bedeutet einen zunehmenden Geschwindigkeitsbetrag, ausgenommen den Zeitpunkt mit Geschwindigkeit null; ein negatives Produkt bedeutet einen abnehmenden Betrag. Übertragen Sie diese Regel nicht unverändert auf eine Bewegung in der Ebene, indem Sie willkürlich nur eine Komponente vergleichen. Dort muss die Projektion der Beschleunigung auf die Geschwindigkeitsrichtung betrachtet werden.

Beschleunigung null über ein Zeitintervall bedeutet einen konstanten Geschwindigkeitsvektor in diesem Intervall. Beschleunigung null zu einem einzigen Zeitpunkt genügt nicht. Ebenso bedeutet ein konstanter Geschwindigkeitsbetrag nicht Beschleunigung null. Die gleichförmige Kreisbewegung ist ein entscheidendes Gegenbeispiel: Der Geschwindigkeitsvektor dreht sich, und seine Ableitung zeigt zum Mittelpunkt. Die Alltagsvorstellung „beschleunigen heißt schneller werden“ muss deshalb erweitert werden, um einen physikalischen Begriff zu bilden.

5. Zeit-Orts-Gleichungen bei konstanter Beschleunigung aufstellen

Ist entlang einer Achse $a_x = a$ konstant und $v_x(0) = v_0$, ergibt die Integration $v_x(t) = v_0 + at$. Eine zweite Integration mit $x(0) = x_0$ liefert $x(t) = x_0 + v_0t + at^2/2$. Die Integrationskonstanten enthalten die Anfangsbedingungen. Wer sie vergisst, löst eine andere Aufgabe. Der Ausdruck gilt nur in der Phase, in der die Beschleunigung als konstant angenommen wird.

Die Ortsänderung lässt sich aus dem Geschwindigkeitsdiagramm wiederfinden: die Rechteckfläche v_0t plus die vorzeichenbehaftete Dreiecksfläche $at^2/2$. Dieser zweite Ansatz ist keine konkurrierende Formel, sondern erläutert, warum die Zeit quadriert auftritt. Behalten Sie beim Vergleich zweier Bahnen dieselben Ursprünge bei oder geben Sie die Unterschiede an. Zwei Ausdrücke mit verschiedenen Konstanten sind nicht zwingend unvereinbar.

Ein Körper startet bei $x_0 = 10$ m mit $v_0 = 4$ m/s und $a = 2$ m/s². Nach 3 s beträgt seine Geschwindigkeit 10 m/s und seine Position 31 m. Die Ortsänderung ist 21 m. Die mittlere Geschwindigkeit während dieser Phase ist $(4 + 10)/2 = 7$ m/s, weil die Geschwindigkeit linear verläuft; multipliziert mit 3 s ergibt sie dieselbe Ortsänderung. Die Endgeschwindigkeit für die gesamte Dauer einzusetzen ergäbe 30 m und würde die Ortsänderung überschätzen.

6. Ein Wurf im gleichförmigen Feld: ein ausdrücklich genanntes Modell

Ein Körper wird vom Ursprung mit dem Anfangsgeschwindigkeitsbetrag v_0 unter dem Winkel α über der Horizontalen geworfen. Im Modell ohne Luftwiderstand beträgt die Beschleunigung $(0, -g)$ mit konstantem g. Aus den Anfangsbedingungen folgen $x(t) = v_0 \cos(\alpha)t$ und $y(t) = v_0 \sin(\alpha)t - gt^2/2$. Horizontale und vertikale Bewegung teilen dieselbe Zeitvariable; sie getrennt zu untersuchen macht sie nicht physikalisch unabhängig.

Ist $\cos(\alpha)$ ungleich null, lässt sich t eliminieren: $y = x \tan(\alpha) - gx^2/[2v_0^2 \cos^2(\alpha)]$. Die Bahn ist in diesem Modell eine Parabel. Am höchsten Punkt ist $v_y = 0$, aber die horizontale Geschwindigkeit bleibt im Allgemeinen ungleich null. Die Zeit bis dorthin beträgt $v_0 \sin(\alpha)/g$. Bei Rückkehr zur gleichen Höhe ist die positive Flugzeit doppelt so groß und die Wurfweite $v_0^2 \sin(2\alpha)/g$. Dieser letzte Ausdruck gilt nicht unmittelbar, wenn Anfangs- und Endhöhe verschieden sind.

Mit $v_0 = 10$ m/s, $\alpha = 30°$ und dem für die Aufgabe gewählten $g = 10$ m/s² ergeben sich $v_y(0) = 5$ m/s, der höchste Punkt nach 0,50 s und eine maximale Höhe von 1,25 m. Die Rückkehr zum Anfangsniveau erfolgt nach 1,0 s; die Wurfweite beträgt etwa 8,66 m. Diese Zahlen beschreiben eine ideale fiktive Situation, keine Anleitung für einen wirklichen Wurf. Wind, Körperform und Luftwiderstand können eine Bahn erheblich verändern.

7. Kreisbewegung: Richtung und Geschwindigkeitsbetrag trennen

Eine kreisförmige Position lässt sich durch $x = R\cos(\omega t)$ und $y = R\sin(\omega t)$ mit konstantem R und ω darstellen. Ableiten ergibt $v_x = -R\omega\sin(\omega t)$, $v_y = R\omega\cos(\omega t)$ und den Betrag $R|\omega|$. Eine zweite Ableitung liefert $a_x = -R\omega^2\cos(\omega t)$, $a_y = -R\omega^2\sin(\omega t)$. Die Beschleunigung ist dem Ortsvektor somit entgegengerichtet: Sie zeigt zum Mittelpunkt und hat den Betrag $R\omega^2 = v^2/R$.

Die Umlaufdauer ist $T = 2\pi/|\omega|$. Auf einem Kreis mit Radius 2 m, der in 4 s durchlaufen wird, beträgt der Geschwindigkeitsbetrag $2\pi R/T = \pi$ m/s und der Beschleunigungsbetrag $\pi^2/2$, also etwa 4,93 m/s². Der Geschwindigkeitsvektor ist während des Umlaufs nie konstant, obwohl sein Betrag konstant bleibt. Diese Beschleunigung ist kinematisch definiert; das nächste Kapitel sucht die resultierende Kraft, die sie hervorrufen kann.

Ändert sich der Geschwindigkeitsbetrag, kommt zur normalen eine tangentiale Komponente hinzu. Im lokalen Bahnkoordinatensystem gilt $a_t = dv/dt$ für den Geschwindigkeitsbetrag v und $a_n = v^2/R$ für eine Kreisbahn. Das lokale Koordinatensystem dreht sich mit der Bewegung: Seine Basisvektoren dürfen nicht wie feste Vektoren abgeleitet werden. Dieser Hinweis verhindert, eine praktische Darstellung der Beschleunigung mit der korrekten Berechnung ihrer Ableitung zu verwechseln.

8. Geschwindigkeit aus einer Aufnahme abschätzen

Positionen, die in regelmäßigen Abständen Δt gemessen werden, erlauben eine zentrale Näherung v(t_i) ≈ [x_(i+1) − x_(i−1)]/(2Δt). Sie verwendet benachbarte Punkte und liefert nicht unmittelbar Werte an den Enden der Aufnahme. Ein kleineres Δt kann schnelle Änderungen genauer beschreiben; zugleich fällt das Positionsrauschen gegenüber der berechneten Differenz stärker ins Gewicht. Eine feinere Abtastung verbessert deshalb nicht automatisch jede Abschätzung.

Für x an drei aufeinanderfolgenden Zeitpunkten mit den Werten 0,12; 0,20; 0,31 m und Δt = 0,10 s beträgt die geschätzte zentrale Geschwindigkeit (0,31 − 0,12)/0,20 = 0,95 m/s. Die mittleren Geschwindigkeiten über die beiden Intervalle sind 0,80 und 1,10 m/s. Ihr Verlauf legt eine positive Beschleunigung in diesem Bezugssystem nahe. Mit nur drei unsicheren Positionen beweist er nicht, dass die Beschleunigung auf der gesamten Bahn konstant bleibt.

Die aus einer zweiten Differenz geschätzte Beschleunigung ist [x_(i+1) − 2x_i + x_(i−1)]/Δt². Hier beträgt sie 3,0 m/s². Der quadrierte Nenner macht die Abschätzung empfindlich gegenüber Positionsfehlern. Prüfen Sie Auflösung, Kalibrierung und Punktverfolgung, bevor Sie eine plötzliche Schwankung der Beschleunigung deuten. Eine berechnete Kurve ist keine direkte Beobachtung unabhängig von ihren Ausgangsdaten.

9. Aufgaben mit Lösungen und typische Fehler

A - Hin- und Rückweg. Ein Körper legt 30 m nach Osten in 10 s zurück und kehrt anschließend 10 m nach Westen in 5 s zurück. Berechnen Sie Strecke, Ortsänderung und die beiden Bewegungsmittelwerte. **Lösung:** Strecke 40 m, Ortsänderung 20 m nach Osten, Dauer 15 s. Die mittlere Geschwindigkeit ist 20/15 = 1,33 m/s nach Osten; Strecke/Dauer ergibt 2,67 m/s. Der einfache Mittelwert aus 3 und 2 m/s ist ungeeignet: Die Phasen dauern unterschiedlich lange.

B - Ideales Anhalten. Ein Körper hat $v_0 = 6$ m/s und $a_x = -2$ m/s² bis zu seinem ersten Stillstand. **Lösung:** $v_x = 6 - 2t$ wird bei 3 s null. Die Ortsänderung ist $6 \times 3 - 3^2 = 9$ m. Würde dieser Ausdruck über 3 s hinaus fortgesetzt, sagte er eine Rückwärtsbewegung voraus; die Fortsetzung gilt nur, wenn dieselbe Beschleunigung tatsächlich weiterwirkt. Bei einem einfachen Bremsvorgang, der im Stillstand endet, müssen Phase und Modell gewechselt werden.

C - Höchster Punkt. Ist die Beschleunigung am Scheitel einer idealen parabelförmigen Flugbahn null? **Lösung:** Nein, sie bleibt $(0, -g)$. Nur die vertikale Geschwindigkeitskomponente ist null. Der Irrtum entsteht, wenn man die Ableitung der Geschwindigkeit durch die Geschwindigkeit selbst ersetzt.

D - Ein Diagramm lesen. Eine Kurve $x(t)$ ist eine Gerade mit der Steigung -3 m/s. **Lösung:** Die Bewegung ist in diesem Bezugssystem gleichförmig und geradlinig, mit $v_x = -3$ m/s und $a_x = 0$. Eine andere Kurve $v_x(t)$ mit der Steigung -3 m/s² würde konstante Beschleunigung beschreiben, also eine andere Situation. Die Achsenbeschriftung bestimmt die Bedeutung der Steigung.

10. Wiederholung und Reichweite

Leiten Sie zur Wiederholung die Zeit-Orts-Gleichungen aus Beschleunigung und Anfangsbedingungen her und prüfen Sie sie dann durch Ableiten. Zeichnen Sie Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung für eine Umkehr getrennt auf. Erklären Sie die Kreisbewegung nicht mit „die Geschwindigkeit ändert sich nicht“, sondern damit, dass ihr Betrag konstant bleibt, während sich ihre Richtung ändert. Jede Beschreibung muss Bezugssystem, Einheiten und untersuchte Phase angeben.

Dieses Kapitel enthält eigenständige Überlegungen und Aufgaben von LFDP. Den Rahmen bildet der veröffentlichte amtliche Lehrplan Physik-Chemie, hier dessen physikalischer Teil: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm ; Anhang für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf. Es werden weder Lehrplantext noch Prüfungsaufgabe noch fremde Zeichnung übernommen. Die Zahlensituationen sind fiktiv und dürfen nicht als Hinweise zur Verkehrssicherheit oder Anleitungen für gefährliche Experimente dienen.

Kapitel 3 - Dynamik: die Kräftebilanz mit einer Beschleunigung verbinden

Historischer Bezug - 1687: Mechanik durch Prinzipien ordnen

Newtons Principia erschien 1687 unter der Schirmherrschaft der Royal Society, die das mit der Erstausgabe verbundene Manuskript aufbewahrt. Dieser Bezug ordnet die untersuchten Gesetze für den Leser in einen mathematischen Aufbau der Mechanik ein, statt sie als bloße Liste numerischer Rezepte zu behandeln. Auch dieses Kapitel folgt einem begründenden Vorgehen: System wählen, Wechselwirkungen bestimmen, projizieren und dann lösen. Die historische Bedeutung eines Werks erspart nicht, die Grenzen des newtonschen Rahmens zu nennen, sobald eine Situation ein anderes Modell verlangt.

Quelle des historischen Sachverhalts, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: Royal Society, Darstellung zum Manuskript der Principia, https://royalsociety.org/blog/2014/07/principia/. Eigenständige didaktische Einordnung von LFDP, ohne wörtliches Zitat oder übernommene Abbildung.

1. Festlegen, worauf die Kräfte wirken

Eine Kraft beschreibt eine Wechselwirkung, die ein anderes System auf das untersuchte System ausübt. Wählen Sie vor der Aufzählung der Kräfte die untersuchte Grenze. Für ein Buch auf einem Tisch kann das System nur das Buch sein: Erde und Tisch üben dann äußere Kräfte aus. Werden Buch und Tisch gemeinsam untersucht, wird ihre gegenseitige Wechselwirkung intern. Eine Kraftliste kann deshalb nicht unabhängig vom gewählten System richtig sein. Das ist die erste Entscheidung einer Dynamikaufgabe.

Stellen Sie jede Kraft als Vektor dar, gekennzeichnet durch Richtung, Orientierung und Betrag in Newton. Für die Translationsbewegung des Schwerpunkts ist die äußere

Resultierende entscheidend. Rotationsprobleme verlangen Angriffspunkte und Drehmomente; dieser Leitfaden ersetzt keinen vollständigen Kurs über die Mechanik starrer Körper. Pfeile an einen Punkt zu zeichnen, der den Schwerpunkt darstellt, ist eine zeichnerische Konvention und keine Behauptung, dass alle Wechselwirkungen tatsächlich dort stattfinden.

Listen Sie die Wechselwirkungspartner auf, bevor Sie nach Formeln suchen: Erde, Unterlage, Seil, Luft, ein anderer geladener Körper. Bewegung ist kein Partner. Deshalb ist keine „Vorwärtsbewegungskraft“ hinzuzufügen, bloß weil sich ein Körper bewegt. Der Geschwindigkeitsvektor beschreibt den Bewegungszustand; Kräfte beschreiben Wechselwirkungen, die den Impuls verändern können.

2. Trägheit und Inertialsysteme

In einem Inertialsystem behält ein isoliertes System oder eines mit äußerer Resultierender null einen konstanten Geschwindigkeitsvektor bei. Es kann ruhen oder sich gleichförmig geradlinig bewegen. Trägheit ist daher keine besondere Tendenz zum Anhalten. Die im Alltag beobachteten Stopps entstehen häufig durch Wechselwirkungen mit dem Boden oder der Luft. Ihre Häufigkeit erklärt die falsche Vorstellung, zur Aufrechterhaltung jeder Geschwindigkeit sei eine Kraft unerlässlich.

Ein Bezugssystem, das sich relativ zu einem Inertialsystem gleichförmig geradlinig verschiebt, ist in der klassischen Mechanik selbst ein Inertialsystem. Ein an einem beschleunigten Fahrzeug befestigtes Koordinatensystem ist es unter denselben Bedingungen nicht. Eine freie Kugel relativ zu diesem Fahrzeug als beschleunigt zu beschreiben bedeutet nicht, dass eine neue physikalische Wechselwirkung auf sie ausgeübt wurde. Um das zweite Gesetz in seiner einfachen Form zu verwenden, wählen Sie

ein geeignetes Bezugssystem; andernfalls sind Trägheitsterme innerhalb einer ausdrücklich genannten Theorie einzuführen.

Ein erdfestes Bezugssystem ist eine übliche Näherung für die kurzen Zeiten und kleinen Entfernungen einer Schulaufgabe. Die Erdrotation begrenzt diese Näherung, besonders bei manchen weiträumigen oder sehr genauen Bewegungen. Eine Annahme kann für einen zwei Sekunden lang verfolgten Wagen hervorragend und für atmosphärische Zirkulation unzureichend sein. Die Eignung eines Bezugssystems hängt vom Problem ab, nicht von einem absoluten Etikett „wahr“ oder „falsch“.

3. Das zweite Gesetz und die Projektion

Der Impuls ist p = mv. Die übliche allgemeine Form für ein materielles System in einem Inertialsystem verbindet die äußere Resultierende mit dp/dt. Für ein geschlossenes System konstanter Masse folgt Summe F_ext = ma. Probleme mit veränderlicher Masse, etwa ein offenes System mit Materieausstoß, verlangen eine passende Bilanz; ma einfach mit veränderlicher Masse zu verwenden, ohne die Austausche zu untersuchen, genügt nicht.

In einem festen orthonormalen Koordinatensystem ergibt die Vektorbeziehung eine Gleichung pro Achse: Summe F_x = ma_x, Summe F_y = ma_y. Die Vorzeichen entstehen aus der Projektion, nicht aus dem Namen der Kraft. Die Gewichtskraft hat entlang einer vertikal nach oben gerichteten Achse die Komponente −mg, entlang einer nach unten gerichteten Achse +mg. Reibung wirkt in einem einfachen Modell dem relativen Gleiten entgegen; ihr Vorzeichen hängt aber von der Gleitrichtung und der gewählten Achse ab.

Die Methode umfasst sechs Schritte: System und Bezugssystem angeben; Wechselwirkungen bestimmen; Achsen wählen; Kräfte projizieren; nach Beschleunigung oder der gesuchten Größe

auflösen; deuten. Ist die Bewegung an eine Unterlage gebunden, liefert dies eine zusätzliche Gleichung. N = mg darf nicht immer vor der Projektion angenommen werden: Ein schräger Zug, eine schiefe Ebene oder eine vertikale Beschleunigung verändern die Normalkraft.

4. Gewichtskraft, Masse und Kontakt

Die Masse kennzeichnet unter anderem die Trägheit in ma; die Gewichtskraft ist im bodennahen Modell P = mg die von der Erde ausgeübte Gravitationskraft. Eine bestimmte Masse behält ihren Wert bei einem Ortswechsel in den gewöhnlichen Situationen dieses Leitfadens, während die Gewichtskraft vom Schwerefeld abhängt. Das Kilogramm ist eine Masseneinheit, das Newton eine Krafteinheit. Eine Gewichtskraft als „2 kg“ zu bezeichnen vermischt zwei Größen, auch wenn die Alltagssprache diesen Ausdruck verwendet.

Die Kontaktkraft einer Unterlage lässt sich in eine normale und eine tangentiale Komponente zerlegen. Auf einer horizontalen Unterlage ohne vertikale Beschleunigung gilt für einen Körper, auf den nur Gewichtskraft und Kontaktkraft wirken, N = mg. Das macht Gewichtskraft und Normalkraft nicht zu einem Paar aus Kraft und Gegenkraft: Die Erde übt die Gewichtskraft auf den Körper aus, die Unterlage ihre Kontaktkraft. Die entsprechenden Gegenkräfte übt der Körper auf die Erde beziehungsweise auf die Unterlage aus.

Ein Aufzug liefert ein fiktives Beispiel. Für eine Person mit der Masse 60 kg und dem Rechenwert g = 10 m/s² ergibt eine nach oben gerichtete Beschleunigung von 1 m/s² die Gleichung N − mg = ma, also N = 660 N. Bei einer gleich großen Beschleunigung nach unten beträgt N = 540 N. Die Masse hat sich nicht geändert, die Kontaktkraft dagegen schon. Eine Waage, die diese Kontaktkraft auswertet, kann daher einen anderen Wert anzeigen,

wenn sie außerhalb der für ihre Umrechnung angenommenen Bedingungen verwendet wird.

5. Reibung: eine vom Zustand abhängige Beziehung

Haftreibung kann Gleiten verhindern und passt sich in einem einfachen Modell bis zu einem maximalen Betrag μ_s N an. Solange der Körper nicht gleitet, ist es falsch, automatisch f = μ_s N zu setzen. Wird ein horizontaler Zug von 2 N durch eine mögliche Haftreibung gleicher Größe ausgeglichen, ist die horizontale Resultierende null. Das Maximum ist eine Grenze, kein immer erreichter Wert.

Sobald Gleiten auftritt, verwendet ein vereinfachtes Modell der Festkörperreibung f = μ_k N, entgegen der Geschwindigkeit relativ zur Unterlage. Die Koeffizienten hängen von den Oberflächen und Bedingungen ab; sie sind keine garantierten universellen Konstanten. Luftwiderstand folgt anderen Modellen, etwa einer Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsbetrag oder seinem Quadrat in bestimmten Bereichen. Die Zustände zu verwechseln würde den Mechanismus falsch bestimmen, selbst wenn die Recheneinheiten stimmig blieben.

Die Richtung ist im erdfesten Bezugssystem nicht immer „rückwärts“. Eine Kiste, die ohne Gleiten von einem beschleunigten Förderband mitgenommen wird, kann eine Reibungskraft in Richtung ihrer Beschleunigung erfahren. Die richtige Frage lautet, welches relative Gleiten verhindert oder gebremst würde. Das Beispiel zeigt, warum beide Oberflächen und ihre relative Bewegung definiert werden sollten, bevor der Pfeil gezeichnet wird.

6. Eine schiefe Ebene: die Koordinatengeometrie nutzen

Ein Körper der Masse m liegt auf einer um den Winkel α geneigten Ebene. Wählen Sie eine zur Ebene parallele Achse hangabwärts und eine nach außen gerichtete Normalachse. Die Gewichtskraft hat die Komponente mg sin(α) hangabwärts und −mg cos(α) entlang der Normalen. Bleibt der Körper in Kontakt und hat keine Normalbeschleunigung, ist die Normalkraft N = mg cos(α). In diesem Koordinatensystem ist die Geometrie einfacher als mit horizontalen und vertikalen Achsen.

Ohne Reibung beträgt die Beschleunigung hangabwärts g sin(α), in diesem Modell unabhängig von der Masse. Bei Gleitreibung entgegen der Abwärtsbewegung beträgt sie g[sin(α) − μ_k cos(α)]. Ein negativer Wert bedeutet, dass der Geschwindigkeitsbetrag bei der Abwärtsbewegung in dieser Phase abnimmt; er beweist nicht, dass der Körper nach dem Stillstand von selbst nach oben gleitet. Im Stillstand müssen Haftreibung und ihre Bedingungen untersucht werden.

In einer fiktiven Aufgabe mit m = 2 kg, α = 30°, μ_k = 0,20 und g = 10 m/s² beträgt N etwa 17,32 N. Die Reibung ist etwa 3,46 N, die hangabwärts gerichtete Gewichtskomponente 10 N. Die Resultierende beträgt daher etwa 6,54 N; daraus folgt a ≈ 3,27 m/s² hangabwärts. Eine Größenordnungskontrolle ist nützlich: Die Reibung verringert hier die Beschleunigung gegenüber den 5 m/s² des reibungsfreien Modells. Dieses Beispiel liefert keinen Koeffizienten für eine reale Oberfläche.

7. Seilspannung und ein zusammengesetztes System

Ein ideales Seil mit vernachlässigbarer Masse und ohne Dehnung überträgt unter passenden Annahmen eine Zugkraft. Bei einer Anordnung ohne massive Rolle oder Reibung kann ihr Betrag oft entlang eines Seilabschnitts als gleich angenommen werden. Diese Vereinfachung gehört zum Modell; sie gilt nicht automatisch für ein massives oder elastisches Seil oder ein Seil über einen energiedissipierenden Mechanismus.

Zwei fiktive Wagen mit den Massen 1 kg und 2 kg sind verbunden und werden reibungsfrei horizontal durch eine Kraft von 6 N gezogen. Werden beide als System gewählt, ist die Seilspannung zwischen ihnen intern: Die Beschleunigung beträgt $6/(1 + 2) = 2$ m/s². Zieht die Kraft am Wagen von 1 kg, wirkt auf den zweiten horizontal nur die Seilspannung; $T = 2\times2 = 4$ N. Für den ersten ergibt $6 - T = 1\times2$ dasselbe Resultat.

Diese doppelte Untersuchung zeigt eine Strategie: Das Gesamtsystem vereinfacht die Berechnung der gemeinsamen Beschleunigung, anschließend macht ein Teilsystem eine interne Wechselwirkung sichtbar. Alle Kräfte beider Zeichnungen ohne Unterscheidung der Systeme zu addieren würde die Seilspannung doppelt zählen. Eine geeignete Grenze zu wählen ist deshalb eine Lösungsmethode, keine Formalität vor der „eigentlichen Rechnung“.

8. Eine Resultierende senkrecht zur Geschwindigkeit

Für eine gleichförmige Kreisbewegung liefert die Kinematik eine zum Mittelpunkt gerichtete Beschleunigung mit dem Betrag v^2/R. Die Dynamik verlangt dann eine radiale Resultierende mit dem Betrag mv^2/R. „Zentripetalkraft“ benennt die Rolle dieser Resultierenden; der Begriff fügt den vorhandenen Kräften keine neue Wechselwirkung hinzu. Je nach Situation übernehmen Seilspannung, Gravitation oder eine Kombination von Kontaktkräften diese Rolle.

Ein Körper von 0,20 kg durchläuft einen idealen horizontalen Kreis mit Radius 0,50 m bei 2,0 m/s. Die Resultierende zum Mittelpunkt muss $0{,}20 \times 2{,}0^2/0{,}50 = 1{,}6$ N betragen. Ist die Seilspannung die einzige horizontale Kraft, hat ihre horizontale Komponente diesen Betrag. Das vertikale Gleichgewicht ist trotzdem zu behandeln. Die Aufgabe muss die Anordnung nennen; die Radialrechnung allein beweist nicht, dass die gesamte Seilspannung in jeder Konfiguration 1,6 N beträgt.

Eine zur Geschwindigkeit senkrechte Kraft kann deren Richtung ändern, ohne ihren Betrag momentan zu ändern. Das bereitet die Verbindung zur später durch das Skalarprodukt $F \cdot v$ definierten Kraftleistung vor. Beschreibungen über Kräfte und über Energie widersprechen sich nicht: Sie untersuchen verschiedene Aspekte desselben Verlaufs. Eine Kraft, die keine Arbeit verrichtet, hat nicht zwangsläufig keine dynamische Wirkung.

9. Elektrisches Feld und Vorzeichen der Ladung

In einem homogenen elektrischen Feld E erfährt ein Teilchen der Ladung q die elektrische Kraft F = qE. Bei positiver Ladung zeigt diese Kraft in Feldrichtung, bei negativer in Gegenrichtung. Unter der Annahme nur einer maßgeblichen Kraft und konstanter Masse beträgt die Beschleunigung a = qE/m. Ein bereits bewegtes Teilchen bewegt sich nicht unbedingt in Richtung dieser Beschleunigung: Die Anfangsbedingungen bleiben unerlässlich.

Für ein fiktives Teilchen mit der Masse 2,0×10^−6 kg und der Ladung 3,0×10^−9 C liefert ein Feld von 4,0×10^3 N/C eine Kraft von 1,2×10^−5 N und eine Beschleunigung von 6,0 m/s². Bei entgegengesetzter Ladung ändert sich nur die Richtung dieser Beschleunigung. In einem Koordinatensystem mit Feldrichtung entlang der positiven x-Achse übernimmt a_x daher das Vorzeichen von q. Die Einheiten N/C multipliziert mit C ergeben tatsächlich N.

Dieses theoretische Beispiel beschreibt weder einen elektrischen Versuch noch ein Haushaltsgerät. Es zeigt, wie ein Feld eine räumlich verteilte Wechselwirkung in eine Kraft auf einen Probekörper übersetzt. Bei einem sehr leichten realen Teilchen müssen Gewichtskraft, Stöße oder relativistische Effekte je nach Bedingungen untersucht werden; sie verschwinden nicht allein dadurch, dass F = qE geschrieben wird.

10. Aufgaben mit Lösungen

A - Schräge Kraft. Ein Block von 2 kg erfährt einen Zug von 5 N unter 30° über der Horizontalen. Er bleibt auf einer horizontalen reibungsfreien Unterlage, mit g = 10 m/s². **Lösung:** Vertikal gilt N + 5 sin(30°) − 20 = 0, also N = 17,5 N. Horizontal ist a_x = 5 cos(30°)/2 ≈ 2,17 m/s². N = 20 N anzusetzen würde die vertikale Zugkomponente übergehen.

B - Resultierende null. Ein Wagen fährt mit 3 m/s bei zwei entgegengesetzten horizontalen Kräften von 4 N. **Lösung:** Ihre Summe ist null; im Inertialmodell mit konstanter Masse bleibt die Geschwindigkeit konstant. Ruhe ist nicht die einzige Lösung. Verschwindet eine Kraft, ändert sich die Phase, und die Beschleunigung wird ungleich null.

C - Gegenseitige Wechselwirkung. Zwei Körper stoßen sich ab. Einer ist massereicher. Sind die Beträge der gegenseitigen Kräfte verschieden? **Lösung:** In der untersuchten Mechanik sind sie gleich groß und entgegengerichtet. Die Beschleunigungen können verschieden sein, weil F/m von der Masse abhängt. Gleiche Kräfte verlangen keine gleichen Wirkungen auf zwei unterschiedliche Systeme.

D - Unmöglicher Kontakt. Eine Rechnung liefert $N < 0$ für eine Unterlage, die nur drücken kann. **Lösung:** Das Modell dauerhaften Kontakts ist mit der Situation unvereinbar geworden. Eine negative Normalkraft ist kein physikalischer Wert, der durch Betragsbildung gerettet werden kann. Untersuchen Sie eine Phase des Kontaktverlusts mit neuer Bilanz und neuen Bedingungen.

11. Wiederholung und Quellen

Stellen Sie eine Kräftebilanz ohne Blick auf die ausgearbeitete Zeichnung auf und prüfen Sie dann, ob jede Kraft einen Wechselwirkungspartner hat. Erklären Sie, warum ein Bewegungszustand keine Kraft ist, warum Haftreibung nicht immer am Grenzwert liegt und warum eine zentripetale Resultierende keine zusätzliche Wechselwirkung ist. Begründen Sie bei jeder Projektion das Vorzeichen, bevor Sie Zahlen für die Symbole einsetzen.

Rahmen des Lernwegs: veröffentlichter amtlicher Lehrplan der französischen Abschlussklasse, physikalischer Teil, https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm.

Bezugspunkte zu Newtons Gesetzen: NASA Glenn, https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/newtons-laws-of-motion/. Überlegungen, Beispiele und Aufgaben sind eigenständige Texte von LFDP; fremde Passagen, Zeichnungen oder Prüfungsaufgaben werden nicht übernommen. Die angegebenen Annahmen gehören zu didaktischen Situationen und zertifizieren keine reale Anordnung.

Kapitel 4 - Energie und Arbeit: eine Grenze wählen und Übertragungen verfolgen

Historischer Bezug - 1849: mechanische Arbeit und Wärmeübertragung verbinden

Das Archiv der Royal Society bewahrt ein Manuskript von James Prescott Joule vom 4. Juni 1849 zum mechanischen Wärmeäquivalent auf; es ging am 6. Juni ein und wurde am 21. Juni vorgetragen. Dieses Dokument liefert einen konkreten Bezug für die Untersuchung der Beziehung zwischen Arbeit und Wärmeübertragung. Es bedeutet nicht, dass der gesamte erste Hauptsatz schon in einer einzigen Schulformel enthalten war. In diesem Leitfaden erinnert es didaktisch daran, dass abnehmende mechanische Energie zur Untersuchung von Übertragungen und anderen Energieformen führen sollte, statt zum Schluss, Energie sei verschwunden.

Quelle des historischen Sachverhalts, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: Royal Society, Archiv PT/37/3, https://makingscience.royalsociety.org/items/pt_37_3/paper-on-the-mechanical-equivalent-of-heat-by-james-p-prescott-joule. Eigenständige didaktische Einordnung von LFDP, ohne wörtliches Zitat oder übernommene Abbildung.

1. Warum ein Energieansatz?

Mit der Dynamik lässt sich die Beschleunigung und bei bekannten Anfangsbedingungen anschließend eine Bahn bestimmen. Manche Fragen verlangen nur einen Geschwindigkeitsbetrag nach einer Ortsänderung oder eine Energieübertragung. Ein Energieansatz kann dann die Berechnung jedes einzelnen Zeitpunkts ersparen. Er ersetzt Kräfte nicht in jeder Situation: Kinetische Energie hängt vom Geschwindigkeitsbetrag ab und bestimmt allein nicht die Geschwindigkeitsrichtung.

Betrachten wir eine Kugel, die eine ideale Bahn hinabfährt. Eine Differentialgleichung entlang der Bahn könnte ihre Bewegung im Einzelnen beschreiben. Wird nur ihr Geschwindigkeitsbetrag in einer bestimmten Höhe gesucht, kann eine Energiebilanz viel direkter sein. Dieser Betrag sagt jedoch nicht, ob die Kugel in einer Kurve in Kontakt bleibt. Dafür ist eine Projektion von Newtons zweitem Gesetz erforderlich. Eine Methode zu wählen heißt deshalb zu prüfen, welche Information sie erhält und welche sie nicht liefert.

Die erste Vorsichtsmaßnahme ist die Definition des Systems. Ein Körper allein, ein Körper mit der Erde und ein Körper mit seiner Unterlage besitzen nicht dieselbe Liste äußerer Übertragungen. Abnehmende mechanische Energie eines Körpers bedeutet keinen Verlust der Gesamtenergie seiner gesamten Umgebung. „Verlust“ bezeichnet häufig Energie, die für den beabsichtigten Zweck weniger nutzbar wird, etwa durch Umwandlung in innere Energie, nicht ihr physikalisches Verschwinden.

2. Arbeit einer konstanten Kraft

Für eine konstante Kraft F an einem Angriffspunkt, der sich von A nach B bewegt, beträgt die Arbeit W_AB(F) = F·AB = F AB cos(θ), wobei θ der Winkel zwischen Kraft und Ortsänderung ist. Arbeit ist eine vorzeichenbehaftete Größe in Joule. Sie ist positiv, wenn eine Kraftkomponente in Richtung der Ortsänderung wirkt, negativ bei einer entgegengesetzten Komponente und null bei senkrechter Orientierung.

Eine konstante Zugkraft von 10 N bildet einen Winkel von 30° mit einer horizontalen Ortsänderung von 3 m. Ihre Arbeit beträgt 10×3 cos(30°), also etwa 26,0 J. Derselbe Kraftbetrag in vertikaler Richtung würde bei dieser horizontalen Ortsänderung keine Arbeit verrichten. Nur Kraftbeträge zu addieren genügt deshalb nicht: Die Orientierung ist entscheidend. Das Skalarprodukt drückt genau diese Abhängigkeit aus.

Bei einer veränderlichen Kraft werden die infinitesimalen Arbeiten F·dr entlang des Wegs addiert; in einer Dimension ergibt dies ein Integral von F(x) dx. Eine vorzeichenbehaftete Fläche unter einem Diagramm von F gegen x kann diese Arbeit darstellen. Ein Bereich unter der Achse liefert einen negativen Beitrag. Ersetzen Sie das Integral nicht durch „Endkraft mal Strecke“, sofern keine Annahme diese Abkürzung erlaubt.

3. Der Arbeit-Energie-Satz

Die kinetische Energie eines Massepunkts konstanter Masse ist $E_c = mv^2/2$, wobei v den Geschwindigkeitsbetrag bezeichnet. Für dieses Modell in einem Inertialsystem ist die Änderung der kinetischen Energie zwischen A und B gleich der Summe der Arbeiten der äußeren Kräfte. ΔE_c = Summe W setzt keine konstante Resultierende voraus. Allerdings müssen die Kräfte zum untersuchten System gehören und ihre Arbeiten über die maßgebliche Ortsänderung ausgewertet werden.

Die Herkunft dieser Beziehung wird durch das Skalarprodukt von ma = Summe F mit der Geschwindigkeit v verständlich. Wegen $d(v\cdot v)/dt = 2a\cdot v$ folgt $d(mv^2/2)/dt$ = Summe $F\cdot v$. Die Integration über die Zeit verbindet Energieänderung und Arbeit. Diese Herleitung verwendet konstante Masse und ein Massepunktmodell. Ein rotierender Festkörper besitzt zusätzlich Rotationsenergie; ihn ohne Begründung auf die kinetische Energie seines Schwerpunkts zu reduzieren wäre unvollständig.

Ein Wagen von 2 kg ändert seinen Geschwindigkeitsbetrag von 1 auf 3 m/s. Die Änderung seiner kinetischen Energie ist $(2/2)(9 - 1) = 8$ J. Liefert ein Zug 12 J und eine andere Kraft −4 J, beträgt die Summe tatsächlich 8 J. Der Satz behauptet nicht, dass nur der Zug Arbeit verrichtet hat. Sind die anderen Übertragungen und Geschwindigkeiten bekannt, kann er auch die Arbeit einer unbekannten Kraft bestimmen.

4. Konservative Kräfte und potenzielle Energie

Eine konservative Kraft erlaubt die Definition einer potenziellen Energie, deren Änderung das Negative ihrer Arbeit ist: $W_{AB} = -[E_p(B) - E_p(A)]$. Ihre Arbeit hängt im betrachteten Gültigkeitsbereich nur von den Endpunkten ab. Potenzielle Energie ist nur bis auf eine additive Konstante bestimmt. Wählen Sie einen zweckmäßigen Nullpunkt; Änderungen und physikalische Ergebnisse hängen nicht von ihm ab.

In einem gleichförmigen Schwerefeld mit vertikaler Achse z nach oben gilt $E_p = mgz$ + Konstante. Ein Anstieg um die Höhe h erhöht diese Energie um mgh, und die Gewichtskraft verrichtet die Arbeit $-mgh$. Bei einem Abstieg kehrt sich das Vorzeichen um. Die Formel enthält die Wechselwirkung mit der Erde; sie darf nicht als geheimnisvoller Vorrat an einer absoluten Höhe ohne Bezug verstanden werden.

Für eine ideale Feder der Federkonstante k mit der Dehnung x gegenüber dem unbelasteten Zustand ist die Rückstellkraft $F_x = -kx$. Eine passende Stammfunktion ergibt $E_p = kx^2/2$. Dieser Wert ist bei Dehnung und Kompression positiv und im unbelasteten Zustand null. Die Kraft zeigt in beiden Fällen zu diesem Zustand. Die Form setzt einen linear-elastischen Bereich voraus und sagt nicht das Verhalten einer stark verformten oder beschädigten Feder voraus.

5. Erhaltung und Bilanz der mechanischen Energie

Für die berücksichtigten konservativen Wechselwirkungen beträgt die mechanische Energie E_m = E_c + E_p. Verrichten nur diese Kräfte Arbeit, bleibt E_m im Modell konstant. Verrichten nichtkonservative Kräfte Arbeit, entspricht die Änderung der mechanischen Energie ihrer Arbeit, sofern System und Wechselwirkungen richtig definiert wurden. Reibung auf einer ruhenden Unterlage kann E_m somit verringern.

Eine fiktive Kugel mit der Masse 0,50 kg startet aus der Ruhe 3,0 m über ihrem Ankunftsniveau. Mit g = 10 m/s², ohne Rotation und ohne Reibung beträgt die Anfangsenergie 15 J. Bei der Ankunft ist sie vollständig kinetisch: v = sqrt(2gh) = sqrt(60), also etwa 7,75 m/s. Die Masse kürzt sich, weil sie beide Energien multipliziert. Diese Vereinfachung bedeutet nicht, dass alle realen Körper durch Luft gleich hinabfallen.

Nehmen wir nun an, die Reibung verrichtet während des Abstiegs −3,2 J Arbeit. Die kinetische Endenergie ist 11,8 J, also v = sqrt(2×11,8/0,50) ≈ 6,87 m/s. Die mechanische Endenergie ist kleiner; die Gesamtenergie ist nicht verschwunden. Um ihre Übertragung zu beschreiben, muss das System um Unterlage und Wärmeaustausch erweitert werden. Rollt die Kugel, ist ein Teil der kinetischen Energie Rotationsenergie: Das wäre wiederum ein anderes Modell.

6. Idealer Anhalteweg und Grenzen seiner Verwendung

Ein theoretisches Bremsmodell mit einer konstanten entgegenwirkenden Kraft vom Betrag f auf einer festen Unterlage liefert $W = -fd$. Bei Anfangsgeschwindigkeitsbetrag v_0 und Endgeschwindigkeit null führt der Arbeit-Energie-Satz zu $d = mv_0^2/(2f)$. Bei $f = \mu mg$ in einem Gleitmodell wird die Strecke $v_0^2/(2\mu g)$. Die Masse kürzt sich nur deshalb, weil die gewählte Kraft proportional zu ihr ist.

Im Modell zeigt dieser Ausdruck eine quadratische Abhängigkeit vom Anfangsgeschwindigkeitsbetrag. Eine Verdopplung von v_0 vervierfacht d, wenn μ und g gleich bleiben. Er liefert keine garantierte reale Strecke: Reaktionszeit, Zustand der Unterlage, Gefälle, Bremsregelung, Kraftänderungen und Luftwechselwirkung werden nicht beschrieben. Ein Schulergebnis darf keine Handlungsanweisung für den Straßenverkehr werden.

Die in einer vorausgehenden Phase mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag zurückgelegte Strecke ist $v_0\Delta t$. Sie kann zu einem Bremsweg addiert werden, wenn die Phasen klar getrennt sind und das Modell dies rechtfertigt. Eine solche Addition zeigt eine gute Gewohnheit: Zeitgrenzen bestimmen, bevor Bilanzen verbunden werden. Eine Formel mit Größen aus verschiedenen Phasen zu verwenden erzeugt häufig eine bedeutungslose Antwort.

7. Eine Feder und der Austausch zwischen zwei Energieformen

Ein Körper der Masse 0,25 kg ist an einer idealen Feder mit der Federkonstante 100 N/m befestigt. In einem horizontalen Modell ohne Reibung oder andere Arbeit entspricht eine Anfangsdehnung von 0,20 m bei Ruhe einer potenziellen Energie von 2,0 J. Beim Durchgang durch die Gleichgewichtslage ist die gewählte potenzielle Energie null; die kinetische Energie beträgt 2,0 J, sodass v = sqrt(2×2,0/0,25) = 4,0 m/s.

Der Energieansatz liefert diesen Geschwindigkeitsbetrag ohne Berechnung der Durchgangszeit. Die Richtung hängt von der Bewegungsphase ab. Eine dynamische Untersuchung würde eine Schwingungsgleichung liefern und die Berechnung der Periodendauer ermöglichen. Die Methoden ergänzen sich: Eine beschreibt eine Gesamtbedingung, die andere den zeitlichen Verlauf. Es ist nützlich, die fehlende Information zu kennen, bevor man die Aufgabe für vollständig gelöst hält.

In einem Diagramm der potenziellen Energie entspricht ein Minimum einem stabilen Gleichgewicht dieses idealen eindimensionalen Systems: Eine kleine Auslenkung erzeugt eine rückstellende Kraft. Ein Maximum entspricht einem instabilen Gleichgewicht. Kraft null an einem Punkt beweist also noch keine Stabilität. Die Form der Energie in seiner Umgebung liefert die notwendige Information. Reibung kann die Bewegung anschließend dämpfen, ohne diese lokale Unterscheidung des konservativen Modells zu ändern.

8. Leistung, Wirkungsgrad und Umwandlungskette

Die momentane Leistung einer Kraft an einem Punkt mit der Geschwindigkeit v ist P = F·v. Ihr Mittelwert über eine Dauer ist die Arbeit geteilt durch diese Dauer. Ein Watt ist ein Joule pro Sekunde. Hohe Leistung kann eine bestimmte Energie schnell bereitstellen; sie ist keine Gesamtenergie. Ein Vorrat in Wh und eine Leistung in W dürfen deshalb weder addiert noch als identische Größen verglichen werden.

Ein fiktiver Mechanismus liefert eine Nutzarbeit von 600 J in 15 s. Seine mittlere Nutzleistung beträgt 40 W. Bei einem Energiewirkungsgrad von 0,85 in dieser Phase ist die empfangene Energie 600/0,85 ≈ 706 J. Der Wirkungsgrad ist die Nutzenergie geteilt durch die empfangene Energie, bei definierter Grenze und definiertem Zweck. Er bedeutet nicht, dass die übrige Energie vernichtet wurde: Sie entspricht Übertragungen, die nicht dem gewählten Zweck dienen.

Bei zwei aufeinanderfolgenden Umwandlungen mit den Wirkungsgraden 0,80 und 0,90 ist der Gesamtwirkungsgrad 0,72, sofern Definitionen und Phasen zusammenpassen. Er ist nicht der Mittelwert 0,85. Das wird an 100 J Eingangsenergie deutlich: Die erste Stufe liefert 80 für die zweite nutzbare Joule, und diese liefert 72. Relative Verluste beziehen sich auf unterschiedliche Mengen. Ein Teil der Übertragungen zurückzugewinnen kann eine Kette verbessern, umgeht aber nicht die Energieerhaltung.

9. Zwischen Kräften und Energie wählen

Verwenden Sie Kräfte, wenn die Frage Beschleunigung, Richtung, Normalkraft oder Seilspannung betrifft. Verwenden Sie Energie, wenn Arbeit leicht berechenbar ist und nach einem Geschwindigkeitsbetrag, einer Höhe oder einer Übertragung gefragt wird. Häufig sind beide Wege nötig. Bei einer Kreisbahn kann die Energie den Geschwindigkeitsbetrag in einer Höhe bestimmen; die radiale Projektion bestimmt anschließend die notwendige Kontaktkraft.

Eine besondere Schwierigkeit entsteht, wenn die Arbeit einer Kontaktkraft von der Bewegung der Unterlage abhängt. Reibung verrichtet nicht an jedem Körper in jedem Bezugssystem stets negative Arbeit. Ein Förderband, das eine Kiste mitnimmt, kann ihr Energie zuführen. Die gesamte Dissipation ist anhand beider Systeme und ihrer Relativbewegung zu untersuchen. Dieser Hinweis verhindert, dass eine häufige Eigenschaft der Reibung auf festem Boden zu einer falsch angewandten absoluten Regel wird.

Auch die Energierechnung verlangt ein einheitliches Bezugssystem: Die kinetische Energie hängt von der Geschwindigkeit in diesem System ab. Ein Körper hat für einen mitfahrenden Beobachter nicht dieselbe kinetische Energie wie für einen Beobachter am Boden. Bilanzen bleiben stimmig, wenn alle Größen im selben Rahmen definiert sind. Geschwindigkeiten verschiedener Bezugssysteme in einer Gleichung zu mischen ergibt keine brauchbare Erhaltungsbeziehung.

10. Aufgaben mit Lösungen

A - Arbeit null. Eine Kraft von 8 N bleibt senkrecht zu einer Ortsänderung von 5 m. **Lösung:** Ihre Arbeit ist null, weil cos(90°) = 0. Diese Kraft kann trotzdem die Geschwindigkeitsrichtung ändern. Arbeit null beweist deshalb keine Beschleunigung null.

B - Höhe. Ein Massepunkt von 0,20 kg besitzt vor einem idealen reibungsfreien Aufstieg 4,0 J kinetische Energie. Um welche Höhe kann er mit g = 10 m/s² steigen, wenn diese Energie vollständig potenziell wird? **Lösung:** mgh = 4,0 ergibt h = 2,0 m. Es wird angenommen, dass keine andere Energieform oder Zwangsbedingung die Bilanz verändert. Der gewählte Höhennullpunkt ändert diese Differenz nicht.

C - Veränderliche Kraft. Entlang einer Achse ist F_x(x) = 6x, mit x in Metern und dem Koeffizienten in N/m. Berechnen Sie die Arbeit von x = 0 bis x = 2 m. **Lösung:** Die Integration von 6x ergibt 3x²; die Arbeit beträgt 12 J. Die Endkraft von 12 N über 2 m einzusetzen ergäbe 24 J, denn die Kraft hatte nicht auf dem gesamten Weg ihren Endwert.

D - Wirkungsgrad. Eine Kette erhält 500 J, überträgt 400 auf eine zweite Stufe und liefert schließlich 300 J Nutzenergie. **Lösung:** Die Wirkungsgrade sind 400/500 = 0,80 und 300/400 = 0,75; ihr Produkt 0,60 ist gleich 300/500. Die beiden nicht nutzbaren Übertragungen betragen in diesem Beispiel jeweils 100 J, ihre relativen Wirkungsgrade sind jedoch verschieden.

E - Unzulässiger Schluss. Zwei Körper haben dieselbe kinetische Energie. Haben sie denselben Geschwindigkeitsbetrag? **Lösung:** Nicht zwingend, denn E_c hängt auch von der Masse ab. Bei einer Energie von 10 J hat eine Masse von 1 kg den Geschwindigkeitsbetrag sqrt(20), eine Masse von 4 kg den Betrag sqrt(5), also die Hälfte. Die Gleichheit einer Größe bestimmt keinen einzelnen Parameter ohne Kenntnis der anderen.

11. Wiederholung und Quellen

Schreiben Sie zur Wiederholung eine symbolische Bilanz vor jedem Einsetzen von Zahlen. Begründen Sie die Vorzeichen der Arbeiten, benennen Sie die Wechselwirkungen jeder potenziellen Energie und nennen Sie die Erhaltungsbedingungen. Erklären Sie dann, was ein Energieergebnis nicht bestimmen kann. Ziel ist die Wahl einer passenden Methode statt die Suche nach einer Formel, in die um jeden Preis sämtliche Angaben passen.

Rahmen und Einheitenquellen: französisches Bildungsministerium, veröffentlichter Lehrplan der Abschlussklasse, https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm ; BIPM, SI-Broschüre, https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen. Erörterungen, Herleitungen und Aufgaben sind eigenständige Texte von LFDP. Die fiktiven Situationen dieses Kapitels schreiben weder einen elektrischen Aufbau noch einen Bremsversuch noch einen riskanten Umgang mit Federn vor.

Kapitel 5 - Gravitation und Umlaufbahnen: eine fortgesetzte Fallbewegung verstehen

1. Eine Fernwirkung und ein Modell

Die newtonsche Gravitation beschreibt die Anziehung zwischen zwei Massen. Für zwei als Punkte behandelte Körper mit den Massen M und m im Abstand r beträgt die Kraft GMm/r^2. Die Konstante G ist innerhalb dieses Modells universell; sie darf nicht mit g verwechselt werden, das ein örtliches Schwerefeld beschreibt. Auf beide Körper wirken gegenseitige Kräfte mit gleichem Betrag und entgegengesetzter Richtung.

Körper als Punkte zu behandeln verlangt eine Begründung. Außerhalb eines vollkommen kugelförmigen Körpers mit kugelsymmetrischer Massenverteilung ist dessen Gravitationsfeld gleich dem einer im Mittelpunkt konzentrierten Masse. Ein realer Körper kann von dieser Form und Verteilung abweichen. Schulische Bahnberechnungen verwenden die Näherung häufig; für genaue Raumfahrtnavigation kann sie unzureichend sein. Ein Ergebnis gewinnt keine physikalische Genauigkeit allein dadurch, dass mit vielen Stellen gerechnet wird.

Wählen Sie einen Einheitsvektor e_r vom anziehenden Mittelpunkt zum Satelliten. Die Kraft auf den Satelliten ist $F = -GMm\, e_r/r^2$. Das Minuszeichen drückt die Anziehung aus. In einem auf den massereichen Körper zentrierten, näherungsweise ruhenden und inertialen Bezugssystem ist die Satellitenbeschleunigung $a = -GM\, e_r/r^2$. Die Masse m kürzt sich in dieser Beziehung; in Energie oder Kraft bleibt sie enthalten. Die Eigenschaften des Bezugssystems und das Fehlen anderer Wechselwirkungen sind anzugebende Annahmen.

2. Vom Gravitationsfeld zur Gewichtskraft am Boden

Das von der Masse M im Abstand r erzeugte Gravitationsfeld hat den Betrag GM/r². Nahe einer kugelförmigen Oberfläche mit Radius R lässt sich g ≈ GM/R² schreiben, wenn Rotation und örtliche Besonderheiten vernachlässigt werden. In der Höhe h beträgt der Abstand vom Mittelpunkt R + h, nicht h. Wer den Radius des anziehenden Körpers vergisst, lässt die Kraft künstlich divergieren, wenn die Höhe gegen null geht.

Das Verhältnis der Felder in der Höhe h und an der Oberfläche ist [R/(R + h)]². Bei h = R beträgt es 1/4. In einer im Verhältnis zu R kleinen Höhe verändert sich das Feld wenig; die Annahme eines gleichförmigen Schwerefelds kann dann angemessen sein. Diese Näherung hat einen Gültigkeitsbereich und darf nicht ungeprüft auf Abstände in der Größenordnung des Radius ausgedehnt werden.

In einer Aufgabe mit R = 6,0×10^6 m und h = 3,0×10^5 m beträgt das Verhältnis (6,0/6,3)² ≈ 0,907. Das Feld ist also etwa 9,3 % schwächer als das Oberflächenfeld des Modells. Dieses Ergebnis beschreibt die vorgegebenen fiktiven Daten, keine Messung eines realen Orts. Es zeigt vor allem, warum eine auf menschlichem Maßstab kleine Höhe in einer Bahnberechnung eine nicht vernachlässigbare Änderung bewirken kann.

3. Kreisbahn: tangentiale Geschwindigkeit und radiale Beschleunigung verbinden

Für eine gleichförmige Kreisbewegung mit Radius r verlangt die Kinematik eine zum Mittelpunkt gerichtete Beschleunigung vom Betrag v^2/r. Wird nur Gravitation als Kraft berücksichtigt, werden v^2/r und GM/r^2 gleichgesetzt. Daraus folgt $v = \sqrt{GM/r}$. Die Geschwindigkeit ist tangential, Kraft und Beschleunigung dagegen radial. Sie wirken der Geschwindigkeit in diesem Modell nicht entgegen und bremsen den Körper nicht; sie ändern dessen Richtung.

Eine Umlaufbahn kann als ein fortgesetzter Fall um den anziehenden Körper verstanden werden. Der Körper befindet sich nicht außerhalb der Wirkung der Gravitation. Eine passende horizontale Geschwindigkeit und die Krümmung des Felds ergeben im Modell eine Bahn, die die Oberfläche nicht trifft. Diese Erklärung ist ein begriffliches Bild; eine wirkliche Umlaufbahn einzurichten verlangt erheblich mehr Bedingungen zu Bahn, Antrieb und Umgebung.

Die Umlaufdauer ist $T = 2\pi r/v$, also $T = 2\pi \sqrt{r^3/(GM)}$. Mit $\mu = GM$ lässt sich rechnen, ohne beide Parameter einzeln zu bestimmen. Für eine fiktive Aufgabe mit $\mu = 4{,}00\times10^{14}\ m^3/s^2$ und $r = 8{,}00\times10^{6}\ m$ beträgt der Geschwindigkeitsbetrag etwa $7{,}07\times10^{3}\ m/s$. Die Umlaufdauer beträgt etwa $7{,}11\times10^{3}\ s$, also etwa 118 min. Die Dimensionskontrolle von $\sqrt{\mu/r}$ ergibt tatsächlich m/s.

4. Zwei Bahnen vergleichen, ohne jede Rechnung zu wiederholen

Um dasselbe anziehende Zentrum ist bei idealen Kreisbahnen v proportional zu r^−1/2 und T zu r^3/2. Wird der Radius vervierfacht, halbiert sich der Geschwindigkeitsbetrag und verachtfacht sich die Umlaufdauer. Mit Verhältnissen zu argumentieren verringert das Fehlerrisiko und macht die Struktur der Gesetze sichtbar. Eine große Bahn kann langsamer durchlaufen werden und dennoch viel mehr Zeit für einen Umlauf verlangen.

Bahnradius und Höhe sind nicht austauschbar. Haben zwei Höhen das Verhältnis vier, gilt dies im Allgemeinen nicht für ihre Radien R + h. Die vorherige Überlegung muss sich daher auf Abstände vom Mittelpunkt beziehen. Vor der Rechnung das Symbol r aufzuschreiben und seine Definition zu nennen verhindert diese häufige Verwechslung.

Auch μ lässt sich aus einer gemessenen Umlaufdauer und einem Radius zurückgewinnen: $\mu = 4\pi^2 r^3 / T^2$. Diese Beziehung schätzt unter den Modellannahmen einen Gravitationsparameter. Sie liefert nicht unmittelbar eine Masse, wenn G unbekannt ist und die übrigen Bedingungen fehlen. Auch die Genauigkeit zählt: Ein kleiner relativer Fehler in r wird durch die dritte Potenz verstärkt.

5. Keplers Gesetze und ihre Reichweite

Keplers Gesetze beschreiben idealisierte Planetenbahnen: eine Ellipse mit dem anziehenden Zentrum in einem Brennpunkt, gleiche überstrichene Flächen in gleichen Zeiten und eine Beziehung zwischen dem Quadrat der Umlaufdauer und der dritten Potenz der großen Halbachse. Die ersten beiden wurden 1609 veröffentlicht, das dritte 1619. Dieser durch die offizielle Darstellung der NASA bestätigte historische Bezug zeigt den Unterschied zwischen der Beschreibung einer Regelmäßigkeit aus Beobachtungen und der späteren Erklärung ihrer Struktur durch ein Wechselwirkungsmodell.

Auf einer elliptischen Bahn verändert sich der Abstand vom Mittelpunkt. Der Geschwindigkeitsbetrag ist nahe dem nächsten Punkt größer und nahe dem fernsten kleiner. Der Flächensatz verhindert deshalb, jede elliptische Bahn als gleichförmige Bewegung zu behandeln. Eine Ellipse hat zwei Brennpunkte; das anziehende Zentrum liegt im Modell in einem davon, nicht im geometrischen Mittelpunkt der Ellipse.

Das dritte Gesetz lautet $T^2/a^3 = 4\pi^2/[G(M + m)]$ für ein ideales newtonsches Zweikörperproblem, wobei a die große Halbachse ihrer Relativbahn ist. Ist m gegenüber M vernachlässigbar, wird im Nenner oft GM verwendet. Für eine Kreisbahn wird a zu r. Die Beziehung $T^2 = a^3$ gilt nur bei geeigneten Einheiten und geeignetem System; sie ist keine universelle Gleichheit zwischen Sekundenquadraten und Kubikmetern.

6. Eine potenzielle Energie für große Abstände

Im zentralen newtonschen Modell wird die potenzielle Energie bei unendlichem Abstand häufig als null gewählt: $E_p(r) = -GMm/r$. Bei endlichem Abstand ist sie negativ. Dieser negative Wert ist kein Mangel: Der Nullpunkt der potenziellen Energie ist eine Konvention. Die radiale Kraft folgt wieder aus $F_r = -dE_p/dr = -GMm/r^2$.

$E_p = mgz$ nahe dem Boden ist eine örtliche Näherung für Änderungen dieser Energie. Verwenden Sie mgh mit konstantem g nicht für beliebig große Abstandsänderungen. Nahe einer Oberfläche lässt sich die Änderung linearisieren; weit von ihr entfernt wird die Abhängigkeit von 1/r wichtig.

Für eine Kreisbahn liefert $v^2 = GM/r$ die kinetische Energie $E_c = GMm/(2r)$. Die gesamte mechanische Energie beträgt daher $E_m = -GMm/(2r)$. Sie ist für diese gebundene Bahn negativ. Die Beziehung erlaubt nicht, aus irgendeiner Energie ohne Prüfung der Bahnform und der Geschwindigkeit einen Kreisradius abzuleiten. Für eine gebundene elliptische Bahn erscheint die große Halbachse in einer entsprechenden Formel, während der momentane Abstand variiert.

7. Fluchtgeschwindigkeit: eine ideale Energieschwelle

In einem Modell ohne Atmosphäre mit einem isolierten anziehenden Zentrum wird die minimale Geschwindigkeit, die das Erreichen unendlichen Abstands bei gegen null gehender Endgeschwindigkeit erlaubt, durch $E_m = 0$ berechnet. Beim Start im Abstand r gilt $mv^2/2 - GMm/r = 0$, also $v_{lib} = \sqrt{2GM/r}$. Sie ist $\sqrt{2}$ mal so groß wie der Geschwindigkeitsbetrag der Kreisbahn im selben Abstand.

Dieser Ausdruck beschreibt weder die Geschwindigkeit einer Rakete während einer ganzen Mission noch einen Startablauf. Ein

Antrieb kann allmählich wirken; Atmosphäre und andere Körper verändern die Bedingungen. Die Beziehung liefert eine Schwelle für einen Körper, der einen Anfangsimpuls erhält und danach ohne Antrieb in einem genau festgelegten Modell bleibt. Sie als „Pflichtgeschwindigkeit jeder Rakete“ zu bezeichnen würde sie falsch deuten.

Mit den fiktiven Daten μ = 4,00×10^14 m³/s² und r = 8,00×10^6 m beträgt die ideale Fluchtgeschwindigkeit 1,00×10^4 m/s, während der Kreisbahngeschwindigkeitsbetrag etwa 7,07×10^3 m/s beträgt. Der Unterschied kommt vom energetischen Ziel: auf einem Kreis gebunden bleiben oder einen beliebig großen Abstand erreichen. Die Rechnungen beantworten verschiedene Fragen.

8. Schwerelosigkeit und gemeinsame Bewegung

In einer frei fallenden Kabine haben Körper und Personen ähnliche Gravitationsbeschleunigungen. Die Kontaktkraft, die eine Person am Boden getragen hat, kann sehr klein werden. Diese Situation heißt häufig Schwerelosigkeit; sie beweist nicht, dass das Gravitationsfeld verschwunden ist. Kontakt und Gravitation müssen wie beim Aufzugbeispiel des Dynamikkapitels getrennt untersucht werden.

In einem idealen orbitalen Bezugssystem kann eine Beschreibung aufgebaut werden, in der gewisse Trägheitskräfte die Gravitation ausgleichen. Das macht sie nicht zu zusätzlichen Wechselwirkungen im ursprünglichen Inertialsystem. Begriffe beider Beschreibungen gleichzeitig ohne Angabe des Bezugssystems zu verwenden führt zu doppelter Zählung. Auf dem hier behandelten Niveau bleibt die Beschreibung der zentripetalen Gravitationsbeschleunigung der direkteste Weg.

Das Feld ist über ein ausgedehntes System nicht vollkommen gleichförmig. Unterschiede der Gravitationsbeschleunigung

zwischen Punkten tragen zu Gezeitenwirkungen bei. Für eine einfache Aufgabe kann eine hinreichend kleine Kabine sie vernachlässigen; ein genaueres Problem muss sie berücksichtigen. Die Näherung gemeinsamer Bewegung behauptet deshalb nicht, dass jeder Punkt jedes Körpers im Raum exakt dieselbe Beschleunigung besitzt.

9. Eine synchrone Bahn und zusätzliche Bedingungen

Eine Bahn, deren Umlaufdauer gleich der Rotationsdauer eines Himmelskörpers ist, ist zeitlich mit dieser Rotation synchronisiert. Im einfachen Modell über demselben Punkt des Äquators zu bleiben verlangt zusätzlich eine Kreisbahn in der Äquatorebene mit derselben Umlaufrichtung wie die Rotation. Gleiche Perioden allein garantieren keine feste scheinbare Position.

Die Beziehung $r^3 = \mu T^2/(4\pi^2)$ berechnet einen idealen synchronen Radius bei gegebenem μ und T. Sie liefert nicht unmittelbar die Höhe: Anschließend ist der Radius des Himmelskörpers abzuziehen. Bei hoher Genauigkeit muss die Aufgabe eine Rotationsdauer von einem willkürlich definierten bürgerlichen Tag unterscheiden. Ohne Prüfung der Daten 24 Stunden zu wählen kann einen begrifflichen Unterschied erzeugen.

Auch in diesem Modell braucht ein Signal eine Zeit ungleich null, um den Abstand zu überbrücken. Ausbreitung und Bahnbewegung sind verschiedene Fragen. Ein scheinbar fester Satellit ruht nicht in einem auf den Himmelskörper zentrierten Bezugssystem; er vollführt einen Umlauf. „Fest“ ist stets auf den betrachteten Beobachter oder das Bezugssystem zu beziehen.

10. Das newtonsche Modell und genauere Modelle

Die newtonsche Gravitation ist für viele Berechnungen der Himmelsmechanik sehr nützlich. Sie beschreibt nicht jedes Gravitationsphänomen ausreichend. Genauigkeitsanforderungen oder besondere Felder verlangen andere Modelle, insbesondere relativistische. Diese Grenze anzuerkennen macht newtonsche Aufgaben nicht nutzlos: Ein Modell kann innerhalb eines Bereichs geeignet sein, ohne universell zu sein.

Der hilfreiche Gegensatz lautet deshalb nicht schlicht „falsche alte Theorie gegen wahre neue Theorie“. Untersuchen Sie Vorhersagen, Bedingungen und Genauigkeit. Ein ausdrücklich als Zweikörperproblem formuliertes Schulproblem vernachlässigt andere Anziehungen bewusst; Missionssoftware kann mehrere Störungen einbeziehen. Die Wahl hängt vom Ziel und der zulässigen Abweichung ab.

Unterscheiden Sie in einem Bericht vorgegebene Parameter, gemessene Parameter und berechnete Ergebnisse. Wurde eine Umlaufdauer zur Anpassung von μ verwendet, ist es keine unabhängige Überprüfung, dieselbe Umlaufdauer anschließend mit diesem μ zurückzugewinnen. Dafür ist eine weitere Beobachtung oder eine nicht zur Anpassung verwendete Vorhersage nötig. Das verbindet Bahnmechanik mit der allgemeinen Prüfungsmethode des ersten Kapitels.

11. Aufgaben mit Lösungen

A - Höhe. Ein Himmelskörper hat den Radius R; ein Satellit befindet sich in der Höhe 2R. Vergleichen Sie sein Feld mit dem Oberflächenfeld. **Lösung:** Sein Abstand vom Mittelpunkt ist 3R, das Verhältnis daher 1/9. Mit 2R ergäbe sich 1/4; das würde Höhe und Bahnradius verwechseln.

B - Umlaufdauer. Zwei fiktive Satelliten durchlaufen Kreise um denselben Himmelskörper mit $r_2 = 9r_1$. **Lösung:** $v_2/v_1 = 1/3$ und $T_2/T_1 = 27$. Die Verhältnisse folgen aus den Potenzen $-1/2$ und $3/2$. Die Satellitenmassen werden gegenüber der Masse des anziehenden Zentrums als vernachlässigbar angenommen.

C - Satellitenmasse. Ändert eine Verdopplung von m bei unverändertem r und M den Kreisbahngeschwindigkeitsbetrag? **Lösung:** Nicht in der Näherung mit festem, dominierendem M, weil sich m in der Beschleunigungsgleichung kürzt. Kraft und Energien verdoppeln sich dagegen. Die Geschwindigkeit mit der Kraft zu verwechseln würde diesen Unterschied verdecken.

D - Einheiten. Prüfen Sie die Dimension von μ. **Lösung:** Wegen $a = \mu/r^2$ hat μ die Dimension $\text{Länge}^3/\text{Zeit}^2$. In $T^2 = 4\pi^2 r^3/\mu$ hat der Quotient deshalb die Dimension Zeit^2. Angaben in km^3/s^2 müssen vor einer Rechnung mit Metern umgerechnet werden.

E - Deutung. Ein Körper besitzt $E_m > 0$ im isolierten Zentralmodell. Kann man behaupten, er bewege sich auf einem Kreis? **Lösung:** Nein; eine gebundene Kreisbahn hat $E_m < 0$, wenn der Energienullpunkt im Unendlichen liegt. Positive Energie ist unter den übrigen Modellbedingungen mit einer ungebundenen Bahn vereinbar. Zur Festlegung dieser Bahn sind weiterhin Geschwindigkeitsrichtung und Drehimpuls erforderlich.

12. Wiederholung und Quellen

Leiten Sie Kreisbahngeschwindigkeitsbetrag und Umlaufdauer aus Newtons Gesetz und der Zentripetalbeschleunigung her. Erklären Sie, warum Gravitation auch bei Schwerelosigkeit vorhanden ist, warum die Höhe zum Körperradius addiert werden muss und warum eine synchrone Periodendauer nicht genügt, einen Satelliten fest erscheinen zu lassen. Schließen Sie jede Rechnung mit einem Satz ab, der das Ergebnis mit den Annahmen verbindet.

Amtliche Quelle zu Keplers Gesetzen und den Jahreszahlen 1609 und 1619: NASA Science, https://science.nasa.gov/solar-system/orbits-and-keplers-laws/, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen. Diese mathematische Erörterung, Vergleiche und Aufgaben sind eigenständige Texte von LFDP; es werden weder historische Erzählung noch Bild noch Passage dieser Seite übernommen. Der veröffentlichte Lehrplan der Abschlussklasse, physikalischer Teil, bildet den schulischen Rahmen: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm. Ausdrücklich fiktive Zahlenparameter sind weder Erdmessungen noch eine einsatzfähige Flugbahn.

Kapitel 6 - Fluide: Druck, Volumenstrom und Grenzen der Strömungsmodelle

Historischer Bezug - 1648: Druck in verschiedenen Höhen vergleichen

Pascals 1648 veröffentlichter Récit de la grande expérience de l'équilibre des liqueurs berichtet über das nach seinen Anweisungen von Florin Périer am Puy de Dôme durchgeführte Experiment. Die BnF hebt hervor, dass die Höhe der Quecksilbersäule mit zunehmender Höhe abnahm. Das Ergebnis ist ein historisches Beispiel eines Vergleichs, der Erklärungen unterscheiden kann: Das Gewicht der Luft wird zur untersuchbaren Ursache, statt einen angeblichen Widerwillen der Natur gegen das Vakuum anzuführen. Die Rechnungen dieses Kapitels bleiben von jenem Experiment getrennt. Sie verlangen weder den Umgang mit Quecksilber noch den Nachbau eines alten Geräts.

Quelle des historischen Sachverhalts, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: BnF, Darstellung der Erstausgabe des Récit, https://www.bnf.fr/fr/etienne-klein-resident-musee. Eigenständige didaktische Einordnung von LFDP, ohne wörtliches Zitat oder übernommene Abbildung.

1. Ein Medium beschreiben, ohne jedes Molekül zu verfolgen

Ein Fluid kann strömen und sich unter einer Belastung verformen. Flüssigkeiten und Gase unterscheiden sich erheblich, insbesondere in ihrer Kompressibilität. Eine makroskopische Beschreibung verwendet örtliche Größen wie Druck, Dichte, Temperatur und Geschwindigkeit. Sie behandelt das Medium auf dem maßgeblichen Maßstab als kontinuierlich; sie behauptet nicht, Materie besitze tatsächlich keine mikroskopische Struktur.

Die Dichte ρ ist Masse geteilt durch Volumen, in kg/m³. Sie kann sich mit Temperatur, Druck oder Zusammensetzung ändern. Ein

inkompressibles Fluid anzunehmen bedeutet hier, dass Dichteänderungen für die Aufgabe vernachlässigbar sind. Es bedeutet nicht, dass keine reale Flüssigkeit komprimiert werden kann. Bei Gasen kann diese Näherung manchmal für bestimmte langsame Strömungen passen, sie ist aber zu prüfen und nicht aus Gewohnheit anzuwenden.

Eine stationäre Strömung besitzt Größen, die sich an jedem festen Punkt zeitlich nicht ändern. Das bedeutet nicht, dass die Fluidteilchen ruhen. Ein Teilchen kann in einer stationären Strömung Bereiche mit verschiedenen Geschwindigkeiten durchlaufen. Den an einem Punkt beobachteten Verlauf von dem entlang eines Teilchens verfolgten Verlauf zu trennen bereitet das richtige Lesen der Bernoulli-Gleichung und der Stromlinien vor.

2. Druck und Kraft: Fläche und Richtung angeben

Im hydrostatischen Modell entspricht Druck der Normalkraft pro Fläche. Seine SI-Einheit ist das Pascal: 1 Pa = 1 N/m². Auf einer kleinen ebenen Fläche bei gleichförmigem Druck beträgt die Druckkraft pA. Bei einer ausgedehnten Fläche mit veränderlichem Druck müssen die örtlichen Beiträge addiert werden; der an einem Punkt gemessene Druck repräsentiert nicht automatisch die gesamte Fläche.

Die Druckkraft wirkt normal zur Fläche. Kräfte an gegenüberliegenden Seiten eines Körpers können sich weitgehend ausgleichen. Ein hoher Absolutdruck erzeugt daher nicht zwingend eine große Resultierende: Diese hängt häufig von einem Druckunterschied ab. Bei einer Platte zwischen zwei Medien mit den gleichförmigen Drücken p_1 und p_2 hat die normale Resultierende den Betrag |p_1 − p_2|A und die durch den höheren Druck bestimmte Richtung.

Bei einem Druckunterschied von 5 000 Pa und einer Fläche von 10 cm², also 0,0010 m², beträgt die resultierende Kraft 5,0 N. Direkt 10 einzusetzen würde einen falschen Faktor von zehntausend einführen. Flächenumrechnungen verdienen besondere Aufmerksamkeit: 1 cm² ist 10^−4 m², weil der Längenfaktor quadriert wird. Ein Hektopascal entspricht 100 Pa und ein Bar 100 000 Pa; diese Einheiten dürfen nicht verwechselt werden.

3. Statik einer Flüssigkeit mit konstanter Dichte

Eine ruhende Flüssigkeit konstanter Dichte befindet sich in einem gleichförmigen Schwerefeld. Bei einer vertikalen Achse z nach oben erfüllt ihr Druck dp/dz = −ρg. Das ergibt sich aus der Kräftebilanz einer kleinen Säule: Die Differenz der Druckkräfte gleicht die Gewichtskraft aus. Zwischen zwei Höhen gilt p_2 − p_1 = −ρg(z_2 − z_1). Der Druck nimmt somit nach unten zu.

In der Tiefe h unter einer Oberfläche mit dem Druck p_0 beträgt der Druck p = p_0 + ρgh. Der Term ρgh ist ein Druckunterschied gegenüber der Oberfläche, nicht zwingend der Absolutdruck. Bei ρ = 1 000 kg/m³, g = 10 m/s² und h = 0,50 m in einer Aufgabe beträgt dieser Unterschied 5 000 Pa. Ist p_0 = 100 000 Pa, beträgt der Absolutdruck 105 000 Pa.

In einer zusammenhängenden, homogenen ruhenden Flüssigkeit haben zwei Punkte gleicher Höhe unter diesen Annahmen denselben Druck. Die Gefäßform geht nicht unmittelbar in den hydrostatischen Unterschied ein. Eine schmale Säule und ein breiter Behälter können daher in gleicher Tiefe denselben Druck erzeugen. Das bedeutet nicht, dass sie dieselbe Masse enthalten oder dass die Kräfte an sämtlichen Wänden gleich sind.

Das Ergebnis gilt nicht unverändert bei stark mit der Höhe variierender Dichte, einem beschleunigten Fluid oder einer Strömung. In der Atmosphäre ist ρ beispielsweise über einen

großen Höhenunterschied im Allgemeinen nicht konstant. Ein einfaches Gesetz kann über eine kleine Höhe angemessen und bei verändertem Maßstab unzureichend sein.

4. Archimedisches Prinzip und verdrängtes Volumen

Unter einem eingetauchten Körper ist der Druck höher als darüber. Die Addition der Druckkräfte ergibt im hydrostatischen Modell eine nach oben gerichtete Resultierende gleich der Gewichtskraft des verdrängten Fluids. Ihr Betrag ist ρ_f gV_immergé für ein homogenes Fluid, wobei ρ_f dessen Dichte ist. Maßgeblich ist das eingetauchte Volumen, nicht zwingend das gesamte Körpervolumen.

Für einen vollständig eingetauchten prismatischen Block lässt sich die Formel verstehen, ohne eine gekrümmte Fläche zu verfolgen. Die seitlichen Kräfte gleichen sich aus. Bei Höhe h und horizontaler Fläche A ist der Druckunterschied zwischen Unter- und Oberseite ρ_f gh. Die Resultierende beträgt deshalb ρ_f ghA = ρ_f gV. Diese Herleitung erklärt, warum die genaue Form in der allgemeinen Beziehung nicht der hauptsächliche Faktor ist.

Ein fiktiver Körper mit der Masse 0,60 kg und dem Gesamtvolumen 0,0010 m³ ist vollständig in eine Flüssigkeit mit der Dichte 1 000 kg/m³ eingetaucht, bei g = 10 m/s². Seine Gewichtskraft beträgt 6,0 N und sein Auftrieb 10 N. Hält ihn keine andere Kraft zurück, ist die anfängliche vertikale Resultierende nach oben gerichtet. Um im Gleichgewicht zu schwimmen, muss er 0,60 kg Flüssigkeit verdrängen, also 0,00060 m³: 60 % seines Volumens sind eingetaucht. Bei veränderlichem Querschnitt bedeutet dies nicht zwingend 60 % seiner Höhe.

Das Schwimmverhalten hängt von der mittleren Dichte im Vergleich zur Fluiddichte und dem zum Verdrängen verfügbaren Volumen ab, nicht allein vom Material einer Wand. Ein Hohlkörper

kann deshalb schwimmen, auch wenn sein Material dichter als die Flüssigkeit ist. Diese Überlegung zertifiziert keine reale Tragfähigkeit: Stabilität, Dichtheit, Fluidbewegung und mechanische Festigkeit sind andere Fragen.

5. Volumenstrom und Massenerhaltung

Der Volumenstrom Q ist das pro Zeit durch einen Querschnitt fließende Volumen, in m³/s. Ist eine gleichförmige Geschwindigkeit normal zur Fläche A angemessen, gilt Q = Av. Bei einem über den Querschnitt veränderlichen Geschwindigkeitsprofil kann eine passende mittlere Geschwindigkeit oder ein Integral verwendet werden. Die einfache Formel bedeutet daher nicht, dass jedes Teilchen in einem wirklichen Rohr gleich schnell strömt.

Bei stationärer Strömung ohne Ansammlung oder Leckage ist die eintretende Masse pro Zeit gleich der austretenden. In einem gleichförmigen Querschnitt ist der Massenstrom ρQ. Ist die Dichte konstant, gelten Q_1 = Q_2 und A_1v_1 = A_2v_2. Bei einem kompressiblen Fluid muss ρ_1A_1v_1 = ρ_2A_2v_2 beibehalten werden; die Dichten ohne Begründung wegzulassen verändert die Bilanz.

Ein fiktiver Volumenstrom von 0,0020 m³/s durchquert eine Fläche von 0,0040 m²: Der mittlere Geschwindigkeitsbetrag ist 0,50 m/s. In einem viermal kleineren Querschnitt von 0,0010 m² beträgt er bei erhaltenem Volumenstrom und erhaltener Dichte 2,0 m/s. Der Volumenstrom ist 2,0 Liter pro Sekunde, denn 1 Liter entspricht 10^−3 m³. Die Verengung erhöht hier die mittlere Geschwindigkeit, nicht die pro Sekunde strömende Flüssigkeitsmenge.

An einer Verzweigung ist der eintretende Volumenstrom gleich der Summe der austretenden, sofern dasselbe inkompressible, stationäre Modell gilt. Gleicher Druck in den Zweigen garantiert

keine gleichen Volumenströme: Längen, Durchmesser und Druckverluste können verschieden sein. Die Erhaltung gibt eine Gesamtbedingung vor; sie liefert nicht alle Beziehungen zur Bestimmung der Verteilung.

6. Bernoulli: Erhaltung unter Bedingungen

Für eine stationäre, inkompressible Strömung ohne nennenswerte viskose Dissipation lautet eine Form der Bernoulli-Gleichung $p + \rho g z + \rho v^2/2 = \text{konstant}$ entlang einer Stromlinie, wenn zwischen den betrachteten Punkten keine Arbeit zu- oder abgeführt wird. Alle drei Terme haben die Dimension eines Drucks. Die Beziehung ist keine universelle Regel, nach der hohe Geschwindigkeit überall niedrigen Druck bedeutet.

Bei gleicher Höhe folgt $p_2 - p_1 = (\rho/2)(v_1^2 - v_2^2)$. Mit den Geschwindigkeitsbeträgen 0,50 und 2,0 m/s des vorigen Beispiels sowie $\rho = 1\,000\ \text{kg/m}^3$ beträgt die Differenz $500(0{,}25 - 4) = -1\,875$ Pa. Der statische Druck am zweiten Punkt ist in diesem Modell niedriger. Die Beziehung hat einen angegebenen Gültigkeitsbereich; sie bestimmt nicht allein die Verluste in einem langen realen Rohr.

Der Term $\rho v^2/2$ wird manchmal dynamischer Druck genannt. Er darf nicht mit dem statischen Druck verwechselt werden, den irgendein beliebiges Gerät misst. Das Gerät, seine Ausrichtung und seine Störung der Strömung bestimmen, was es misst. Mathematischer Ausdruck und experimentelle Beobachtung müssen wie bei den anderen Modellen dieses Leitfadens über ein Verfahren verbunden werden.

Die Annahmen werden durch die offizielle Darstellung der Bernoulli-Gleichung bei NASA Glenn bestätigt, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/bernoullis-equation/. Die Erörterung und Zahlen hier sind eigenständig; keine Zeichnung oder

Herleitung der Seite wird übernommen.

7. Ein Behälter und die ideale Ausflussgeschwindigkeit

Ein Behälter habe eine im Vergleich zu einer kleinen Öffnung sehr große freie Oberfläche. Im idealen Modell wird die Oberflächengeschwindigkeit vernachlässigt, der Druck an Oberfläche und Ausfluss ist gleich, und die Strömung wird als annähernd stationär behandelt. Bernoulli liefert v_sortie = sqrt(2gh), wobei h der Höhenunterschied zwischen Oberfläche und Öffnung ist. Diese Beziehung wird häufig Torricellis Gesetz genannt.

Mit h = 1,25 m und dem Rechenwert g = 10 m/s² beträgt der ideale Geschwindigkeitsbetrag 5,0 m/s. Sinkt die freie Oberfläche, ändert sich h und damit auch dieser ideale Betrag. Er darf deshalb nicht während der gesamten Entleerung ohne Erörterung des veränderlichen Pegels beibehalten werden. Auch der Volumenstrom hängt vom wirksamen Querschnitt und den Abweichungen vom Idealmodell ab, insbesondere Strahleinschnürung und Verlusten.

Die Ähnlichkeit mit der beim freien Fall durch dieselbe Höhe erreichten Geschwindigkeit zeigt eine gemeinsame Energiestruktur. Sie bedeutet nicht, dass die gesamte Strömung mit der Bewegung eines Massepunkts identisch wäre. Druck, Geometrie, Kontinuität und Wandkontakt bringen fluidspezifische Bedingungen mit. Eine Analogie hilft, wenn benannt wird, was sie vergleicht und was sie auslässt.

8. Viskosität und Druckverluste

Viskosität beschreibt den Widerstand bei Verformungen und Geschwindigkeitsunterschieden zwischen Fluidschichten. Sie kann mechanische Energie dissipieren. In einem realen Rohr kann die Aufrechterhaltung eines Volumenstroms auch zwischen Querschnitten gleicher Höhe und gleicher mittlerer Geschwindigkeit einen Druckunterschied erfordern. Die ideale verlustfreie Bernoulli-Strömung beschreibt diese Situation nicht ausreichend.

Ein Druckverlustterm lässt sich in eine Energiebilanz aufnehmen, wenn Definition und Einheit angegeben sind. Ein dissipativer Druckabfall ist kein Verschwinden von Masse oder Gesamtenergie; ein Teil der mechanischen Energie wird innere Energie. Pumpen können Energie zuführen, andere Geräte sie entnehmen. Wieder werden die Systemgrenzen entscheidend.

Als wissenschaftliche Vertiefung betrachten wir eine stationäre, vollständig ausgebildete laminare Strömung eines inkompressiblen newtonschen Fluids mit konstanter Viskosität in einem geraden, horizontalen zylindrischen Rohr mit konstantem Radius und Haftbedingung an den festen Wänden. Ihr Volumenstrom kann mit $Q = \pi r^4 \Delta p/(8\eta L)$ beschrieben werden, wobei η die dynamische Viskosität, L die Länge des untersuchten Abschnitts, r dessen Innenradius und Δp der Druck stromaufwärts minus dem Druck stromabwärts ist; Q ist in dieser Richtung positiv. Dieses Gesetz wird als besonderes Modell angegeben, nicht als Beziehung für jedes Rohr. Es zeigt die starke Radiusabhängigkeit und den Unterschied zur idealen Erhaltung ohne Viskosität. Turbulenz, Einlaufbereiche, Krümmungen oder veränderliche Eigenschaften verlangen andere Beschreibungen.

9. Kraftübertragung erzeugt keine Energie

In einer idealen ruhenden hydraulischen Vorrichtung kann eine Druckänderung durch eine Flüssigkeit übertragen werden und an Kolben verschiedener Flächen unterschiedliche Kräfte erzeugen. Wirkt derselbe Druckunterschied auf A_1 und A_2, gilt F_2/F_1 = A_2/A_1. Eine größere Fläche kann somit eine größere Kraft erfahren. Dadurch wird Arbeit nicht kostenlos vervielfacht.

Die Erhaltung des verdrängten Volumens verlangt im inkompressiblen Modell ohne Leckagen A_1d_1 = A_2d_2. Einer größeren Kraft entspricht eine kleinere Verschiebung, und im Idealfall gilt F_1d_1 = F_2d_2. Bei einem Flächenverhältnis von 10 entspricht eine Kraft von 10 N am kleinen Kolben 100 N am großen; einer Verschiebung von 5 cm des kleinen entsprechen 0,5 cm des großen. Beide Arbeiten betragen 0,50 J.

Reibung und Verformung verringern die reale Nutzarbeit. Diese Rechnungen sind Erhaltungsaufgaben, keine Bau- oder Hebeanleitungen. Maximaldruck, Materialfestigkeit, Stabilität und Schutzmaßnahmen werden nicht untersucht. Eine physikalische Formel reicht nicht zur Validierung eines Geräts.

10. Aufgaben mit Lösungen

A - Relativer Druck. Eine Flüssigkeit mit der Dichte 800 kg/m³ hat an der Oberfläche einen Druck von 100 000 Pa. Berechnen Sie mit g = 10 m/s² den Druck in 2 m Tiefe. **Lösung:** Der hydrostatische Unterschied beträgt 16 000 Pa, der Absolutdruck 116 000 Pa. Nur 16 000 Pa ohne Kennzeichnung als relativer Druck anzugeben wäre mehrdeutig.

B - Querschnitt. Ein Volumenstrom von 3 Litern pro Sekunde durchquert eine Fläche von 6 cm². **Lösung:** Q = 0,003 m³/s und A = 0,0006 m², also v_moy = 5 m/s. Verdoppelt sich die Fläche bei erhaltenem Volumenstrom, halbiert sich der

Geschwindigkeitsbetrag. Das Ergebnis verwendet konstante Dichte und beschreibt kein garantiertes reales Gerät.

C - Schwimmen. Ein homogener Körper mit der Dichte 600 kg/m³ schwimmt in einer Flüssigkeit mit der Dichte 1 000 kg/m³. **Lösung:** Im idealen Gleichgewicht gilt ρ_obj gV_total = ρ_liquide gV_immergé. Der eingetauchte Volumenanteil beträgt 0,60. Derselbe Höhenanteil verlangt eine Form mit entsprechend konstantem Querschnitt.

D - Bernoulli. In einer idealen horizontalen Strömung ist der Geschwindigkeitsbetrag an den Punkten 1 und 2 gleich, eine Messung zeigt jedoch einen Druckabfall. **Lösung:** Diese Beobachtung verlangt die Prüfung der Annahmen: Dissipation, Energiezufuhr oder -entnahme, Stationarität und Messungen. Erzwingen Sie die ideale Beziehung nicht durch Streichen einer Angabe. Das Modell kann unzureichend oder das Verfahren fehlerhaft sein.

11. Wiederholung und Reichweite

Verbinden Sie zur Wiederholung jede Formel mit ihrer Bilanz: Kräfte bei der Statik, Volumen oder Masse beim Volumenstrom, Energie bei Bernoulli. Prüfen Sie stets, ob Druck absolut oder relativ, Geschwindigkeit örtlich oder gemittelt und Volumen insgesamt oder eingetaucht gemeint ist. Diese Unterscheidungen sind oft wichtiger als die Schwierigkeit der Rechnung.

Schulischer Rahmen: veröffentlichter Lehrplan der Abschlussklasse, physikalischer Teil, https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm. Zusätzliche amtliche Quelle: NASA Glenn zu Bernoulli, oben verlinkt. Eigenständiger LFDP-Text und eigene Aufgaben ohne wörtliches Zitat oder übernommene Abbildung. Die Idealfälle erlauben weder gefährlichen Umgang mit Druck noch Tauchen noch eine Hausinstallation noch die Herstellung eines Pflegegeräts.

Kapitel 7 - Elektrizität: Ladung, Energie und zeitliche Entwicklung eines RC-Kreises

Historischer Bezug - 1800: ein Briefwechsel über elektrische Phänomene

Die Royal Society bewahrt einen Brief Alessandro Voltas an Joseph Banks vom 20. März 1800 über Elektrizität im Zusammenhang mit dem Kontakt leitender Stoffe unterschiedlicher Art auf. Diese Archivquelle ordnet elektrische Phänomene in eine Forschung mit Geräten und wissenschaftlichem Austausch ein. Das historische Objekt ungeprüft mit der idealen Quelle der Aufgaben gleichzusetzen wäre irreführend. Das Kapitel trennt gerade das wirkliche Phänomen von den zu seiner Modellierung gewählten Beziehungen: Spannung, Strom, Widerstand und kapazitive Speicherung beantworten verschiedene Fragen.

Quelle des historischen Sachverhalts, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: Royal Society, Archiv L&P/11/137, https://makingscience.royalsociety.org/items/l-and-p_11_137/letter-account-of-electricity-excited-by-contact-and-conducting-substances-of-different-kinds-from-alessandro-volta-to-joseph-banks. Eigenständige didaktische Einordnung von LFDP, ohne wörtliches Zitat oder übernommene Abbildung.

1. Elektrische Ladung und Stromstärke

Elektrische Ladung ist eine vorzeichenbehaftete Größe in Coulomb. Ein System kann eine positive, negative oder insgesamt verschwindende Ladung tragen. Strom entspricht einer Ladungsübertragung pro Zeit. Durchquert die Ladungsmenge Δq während Δt einen Querschnitt, ist die mittlere Stromstärke Δq/Δt; die momentane Stromstärke ist die Ableitung der übertragenen Ladung entlang einer gewählten Richtung. Ein Ampere entspricht einem Coulomb pro Sekunde.

Die technische Stromrichtung ist die Bewegungsrichtung positiver Ladungen. In einem Metall bewegen sich freie Elektronen entgegen dieser Richtung. In anderen Medien können mehrere Ladungsträgerarten beitragen. Das Vorzeichen einer Stromstärke in einer Gleichung hängt deshalb von einer Orientierung ab und darf nicht allein mit der Bewegungsrichtung eines einzelnen Elektrons gleichgesetzt werden.

Eine konstante Stromstärke von 2,0 mA während 3,0 s entspricht einer übertragenen Ladung von 6,0 mC. Bei veränderlichem Strom wird i(t) über die Dauer integriert oder eine vorzeichenbehaftete Fläche unter seinem Diagramm berechnet. Ein Stromendwert beschreibt nicht zwingend die gesamte Phase. Das ähnelt dem Unterschied zwischen Endgeschwindigkeit und Ortsänderung bei beschleunigter Bewegung.

2. Spannung und Potenzialdifferenz

Eine Spannung U_AB ist eine Potenzialdifferenz V_A − V_B in Volt. Ein Volt entspricht einem Joule pro Coulomb. Spannung ist keine gespeicherte Ladungsmenge, und Strom ist keine bewegte Spannung. Die Größen beschreiben verschiedene Aspekte: Potenzial zwischen zwei Punkten und Ladungsfluss in einem Zweig.

Werden die Punkte vertauscht, ändert sich das Vorzeichen: $U_{BA} = -U_{AB}$. In einer idealen Schaltung mit konzentrierten Bauelementen und vernachlässigbaren ausgelassenen Induktionseffekten addieren sich Potenzialdifferenzen entlang eines Wegs. Ihre vorzeichenbehaftete Summe um eine geschlossene Masche ist null. Die Maschenregel bedeutet nicht, nur die positiven Bauteilwerte zu addieren; die Orientierungen sind maßgeblich.

Die Ladungserhaltung liefert im Modell ohne nennenswerte Ladungsansammlung am Knoten die Knotenregel: Summe der eintretenden Ströme = Summe der austretenden Ströme. Bei einem eintretenden Strom von 5 mA und zwei austretenden von 2 und 3 mA ist die Bilanz stimmig. Ein ladungsspeicherndes Bauteil wie ein Kondensator bleibt mit dieser Erhaltung vereinbar: Speicherung muss in System und Anschlüssen berücksichtigt werden.

3. Widerstand und Leistungskonvention

Für einen idealen ohmschen Leiter in einem bestimmten Betriebsbereich gilt $u = Ri$, mit R in Ohm. Verwenden Sie das Verbraucherzählpfeilsystem: Der Strom tritt an der Klemme ein, deren Potenzial für u als positiv genommen wird. Die empfangene elektrische Leistung ist dann $p = ui$. Bei $R > 0$ ist $p = Ri^2 = u^2/R$ positiv und entspricht im Modell einer Übertragung in innere Energie.

Ein Widerstand von 1,0 kΩ bei 5,0 V führt einen Strom von 5,0 mA und empfängt eine Leistung von 25 mW. Bleiben diese Werte für 20 s konstant, beträgt die empfangene Energie 0,50 J. Rechnen Sie die Vorsätze vor Anwendung der Gesetze um. kΩ mit Ω zu verwechseln würde die Stromstärke vertausendfachen; mW mit W zu verwechseln würde die Energie vertausendfachen.

Das ohmsche Gesetz gilt nicht universell für jedes Bauteil. Eine Diode, eine Lampe mit stark veränderlicher Temperatur oder eine reale Quelle können andere Modelle verlangen. Der Widerstand einer Aufgabe ist ein Modellparameter, keine Verhaltensgarantie bei jeder Spannung. Keine Rechnung dieses Abschnitts validiert eine Installation, Stromversorgung oder reale Schaltung.

4. Einfache Kombinationen und Modellgrenzen

Bei in Reihe geschalteten Widerständen mit demselben Strom addieren sich die Spannungen, und $R_{eq} = R_1 + R_2$. Bei parallel geschalteten Widerständen an derselben Spannung addieren sich die Ströme, und $1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2$. Diese Gleichheiten folgen aus Maschen- und Knotenregel; wenden Sie sie nicht allein deshalb an, weil zwei Elemente in einer Zeichnung nahe beieinanderstehen.

Zwei gleiche Widerstände von 2 kΩ ergeben 4 kΩ in Reihe und 1 kΩ parallel. Der Ersatzwiderstand positiver paralleler Zweige ist kleiner als der kleinste einzelne Widerstand. Das erlaubt eine Größenordnungskontrolle. In Reihe ist er dagegen größer als jeder einzelne. Ein vertauschtes Ergebnis weist häufig auf eine Verwechslung der Schaltungsstruktur hin.

Eine reale Quelle lässt sich in einem begrenzten Bereich durch die elektromotorische Kraft E und den Innenwiderstand r beschreiben: Bei aus der Quelle austretendem Strom beträgt die Lastspannung $U = E - ri$. Der Spannungsabfall erinnert an die Grenzen idealer Bauelemente. Das Modell darf ohne weitere Daten nicht zur Abschätzung eines Kurzschlusses oder einer gefährlichen Situation verwendet werden; Schutzvorrichtungen, Übergangsvorgänge und reale Eigenschaften fehlen.

5. Ein idealer Kondensator und seine Kapazität

Ein idealer Kondensator hat im einfachen Modell zwei Platten mit entgegengesetzten Ladungen. Bezeichnet q die Ladung der Platte A und u = V_A − V_B, gilt q = Cu bei konstantem C in Farad. Ein Farad ist ein Coulomb pro Volt. Das Vorzeichen von q ist mit dem von u verbunden; eine positive Kapazität bedeutet keine stets positive Ladung.

Im Verbraucherzählpfeilsystem mit Strom in die Platte A gilt i = dq/dt = Cdu/dt. Der Kondensator kann somit Strom aufnehmen, wenn sich seine Spannung ändert, obwohl keine Ladung das ideale Dielektrikum zwischen den Platten durchquert. Ohne Angabe des Zustands zu sagen, er „sperre den Strom“, ist irreführend: Bei stationärer konstanter Spannung ist der ideale Strom null; während eines Übergangsvorgangs kann er ungleich null sein.

Eine Kapazität von 100 µF bei 5,0 V entspricht auf der positiven Platte einer Ladung von 500 µC oder 0,00050 C. Steigt die Spannung linear von 0 auf 5 V in 0,50 s, ist der Strom dieses Modells C×10 V/s = 1,0 mA. Ein anders geformter Anstieg ergäbe einen anderen Strom. Die Kapazität verbindet Ladung und Spannung; sie bestimmt allein nicht die Dauer eines Vorgangs.

6. Gespeicherte Energie und Kondensatorkombinationen

Wird die infinitesimale Ladung dq in den Kondensator übertragen, beträgt die empfangene Energie u dq. Mit u = q/C ergibt die Integration von null bis q die Energie E_capa = q²/(2C) = Cu²/2. Der Faktor 1/2 entsteht, weil die Spannung während der Übertragung steigt; die Endspannung einfach mit der gesamten Ladung zu multiplizieren würde die gespeicherte Energie verdoppeln.

Bei C = 100 µF und u = 5,0 V beträgt die Energie 0,00125 J oder 1,25 mJ. Sie ist von der Ladung 500 µC zu unterscheiden. Zwei Kondensatoren verschiedener Kapazitäten können dieselbe

Spannung und verschiedene Energien besitzen. Ein Vergleich muss deshalb festlegen, welche Größe gemeinsam ist.

Parallel sind die Spannungen gleich, und die Ladungen addieren sich: C_eq = C_1 + C_2. In Reihe sind im Modell zweier anfänglich neutraler Kondensatoren mit isoliertem Zwischenknoten die Ladungsbeträge gleich, und 1/C_eq = 1/C_1 + 1/C_2. Für 2 µF und 3 µF ergeben sich Ersatzkapazitäten von 5 µF parallel und 1,2 µF in Reihe.

Bei insgesamt 10 V in Reihe beträgt die Ladung 12 µC. Die Spannungen sind dann 6 V am Kondensator von 2 µF und 4 V an jenem von 3 µF. Ihre Summe ergibt wieder 10 V. Eine gleiche Spannungsverteilung ist nicht automatisch gegeben; sie verlangt hier gleiche Kapazitäten. Auch Anfangsbedingungen und bereits vorhandene Ladungen können eine allgemeinere Aufgabe verändern.

7. Einen RC-Kreis laden: die Gleichung aufstellen

Eine ideale Quelle mit konstanter Spannung E versorgt einen Widerstand R und einen Kondensator C in Reihe. Wählen Sie i als Ladestrom in die positive Kondensatorplatte. Die Maschenregel liefert E = Ri + u_c und i = Cdu_c/dt. Daraus folgt RCdu_c/dt + u_c = E. Diese Gleichung beschreibt den Übergangsvorgang unter den angegebenen idealen Annahmen.

Mit τ = RC lautet die Lösung bei u_c(0) = u_0: u_c(t) = E + (u_0 − E)e^(−t/τ). Prüfen Sie sie durch Ableiten und Einsetzen. Bei t = 0 ergibt der Ausdruck u_0; langfristig strebt er gegen E. Bei Anfangswert null folgen u_c = E[1 − e^(−t/τ)] und i = (E/R)e^(−t/τ).

Der Strom ist im Modell anfangs E/R und nimmt danach ab. Die Kondensatorspannung ändert sich bei endlichem Strom stetig, anders als die ideale, von der Quelle beim Phasenwechsel

vorgegebene Spannung. Ein Umschalten erlaubt deshalb nicht, u_c willkürlich auf null zurückzusetzen. Bleibt eine vorherige Ladung erhalten, wird sie zur neuen Anfangsbedingung.

8. Zeitkonstante und Genauigkeit eines Schwellenwerts

Das Produkt RC hat die Dimension einer Zeit: Ω×F = s. Bei R = 10 kΩ und C = 100 µF beträgt τ = 1,0 s. Für E = 5,0 V und u_0 = 0 beträgt die Spannung nach einer Zeitkonstante 5(1 − e^−1) ≈ 3,16 V, also etwa 63,2 % ihres Endwerts. Nach drei Zeitkonstanten erreicht sie etwa 95,0 %, nach fünf etwa 99,3 %.

In dieser idealen Lösung wird der Endwert in endlicher Zeit nie exakt erreicht. „Vollständig geladen“ bedeutet deshalb, dass ein Genauigkeitskriterium gewählt wurde. Um mindestens 99 % von E zu erreichen, löst man 1 − e^(−t/τ) ≥ 0,99 und erhält t ≥ −τ ln(0,01) ≈ 4,605τ. Dieser Schwellenwert ist genauer als die absolute Behauptung „nach fünf τ ist es exakt abgeschlossen“.

Auch ein Diagramm erlaubt die Abschätzung von τ. Am Ursprung hat die Tangente an die Ladekurve eines anfänglich neutralen Kondensators die Steigung E/τ und trifft das Niveau E bei t = τ. Diese Konstruktion verlangt einen richtig kalibrierten Maßstab und ein passendes Modell. Eine grafische Abschätzung besitzt Unsicherheit; sie ist nicht allein deshalb ein exakter Parameter, weil eine Gerade gezeichnet wurde.

9. Entladen und die Konvention wechseln

Ein Kondensator mit der Anfangsspannung U_0 wird anschließend ohne ideale Quelle mit einem Widerstand verbunden. Seine Spannung erfüllt RCdu_c/dt + u_c = 0, also u_c(t) = U_0e^(−t/τ). Wird i_d als Strom aus der positiven Platte durch den Widerstand definiert, gilt i_d = u_c/R = −Cdu_c/dt. Das Minuszeichen folgt aus der abnehmenden Ladung dieser Platte.

Würde der Strom weiterhin als in die Platte eintretend definiert, wäre er während dieser Entladung bei $U_0 > 0$ negativ. Beide Beschreibungen sind stimmig; ein unangekündigter Konventionswechsel erzeugt nur einen scheinbaren Widerspruch. Die Zeichnung oder der Satz zur Stromrichtung muss deshalb die Gleichung begleiten.

Die Kondensatorenergie verläuft wie $e^{(-2t/\tau)}$, weil sie proportional zu u_c^2 ist. Sie nimmt nicht nach derselben Exponentialfunktion wie die Spannung ab. Bei $t = \tau$ beträgt die Spannung etwa 36,8 % ihres Anfangswerts, die Energie jedoch etwa 13,5 %. Dieser Unterschied übt die Deutung von Größen: Ein Zeitgesetz überträgt sich nicht unverändert auf sämtliche verbundenen Größen.

10. Energiebilanz des Ladens

Beim idealen Laden von null bis E über R überträgt die Quelle insgesamt die Ladung CE. Ihre gelieferte Energie beträgt deshalb CE^2, da ihre Spannung E bleibt. Der Kondensator speichert $CE^2/2$; die andere Hälfte wird in diesem Modell im Widerstand dissipiert. Das kann überraschen, weil eine Vergrößerung oder Verkleinerung von R Dauer und Strom ändert, nicht aber diese gesamte Verteilung im Idealmodell.

Übertragen Sie das Ergebnis nicht ungeprüft auf $R = 0$. Das Modell sagt dann einen Übergang von Dauer null und einen unbeschränkten Strom voraus: Die physikalischen Annahmen reichen nicht aus. Reale Widerstände, Induktivitäten, Quellengrenzen und Strahlungseffekte werden maßgeblich. Ein mathematischer Grenzwert kann einen Gültigkeitsbereich sichtbar machen, statt ein mögliches Gerät zu beschreiben.

Der Vergleich mit einer Batterie erinnert erneut an den Unterschied zwischen Energie und Kapazitätsangabe. Eine Batteriekapazität in

Ah ist eine Ladungsmenge; eine Abschätzung in Wh verwendet zusätzlich die Spannung. Beispielsweise entsprechen 2 Ah bei einer Nennspannung von 3,7 V einer nominalen Abschätzung von 7,4 Wh. Weil sich die Spannung während der Nutzung ändert, garantiert diese Multiplikation weder die tatsächlich verfügbare Energie noch die Betriebsdauer eines Geräts.

11. Aufgaben mit Lösungen

A - Einheiten. R = 2,0 kΩ und C = 250 µF. **Lösung:** τ = 2 000×250×10^−6 = 0,50 s. Die Werte 2 und 250 ohne Vorsätze zu multiplizieren ergibt keine Zeit in Sekunden.

B - Anfangsbedingung. Ein Ladekreis hat E = 6 V, τ = 2 s und u_c(0) = 2 V. **Lösung:** u_c(t) = 6 − 4e^(−t/2). Bei t = 0 beträgt die Spannung 2, langfristig 6. Mit 6[1 − e^(−t/2)] würde die anfängliche Ladung vergessen.

C - Entladeschwelle. Wann wird u_c höchstens ein Zehntel von U_0? **Lösung:** e^(−t/τ) ≤ 0,10, also t ≥ τ ln(10) ≈ 2,303τ. Dies ist ein theoretisches relatives Kriterium und keine Prüfanweisung für elektrische Sicherheit.

D - Relative Energie. Was passiert mit der Energie, wenn die Spannung durch drei geteilt wurde? **Lösung:** Sie wird durch neun geteilt, denn E_capa = Cu²/2 bei konstantem C. Eine Division durch drei entspräche einer linearen Beziehung, nicht der Energiebeziehung.

E - Stationäres Modell. Ein idealer Kondensator liegt seit langer Zeit an konstanter Spannung. **Lösung:** du_c/dt = 0, daher ist der ideale Strom null. Ladung und Energie können ungleich null bleiben. Fehlender Strom bedeutet nicht das Fehlen jeder gespeicherten elektrischen Größe.

Vertiefung - Kapazitätsgeometrie und Sensorprinzip

Bei zwei parallelen ebenen Platten, getrennt durch einen homogenen Isolator, liefert das Modell ohne Randeffekte C = εS/d. S ist die gegenüberliegende Fläche, d der Abstand und ε die Permittivität des Mediums in F/m. Im Vakuum ist ε = ε0; für ein ideales lineares Dielektrikum schreibt man ε = ε0εr. Insbesondere müssen die seitlichen Abmessungen gegenüber d groß sein. Die Beziehung beschreibt weder ein beliebig geformtes Bauteil noch ein Medium mit stark veränderlichen Eigenschaften exakt.

Bei festem Material und Abstand verdoppelt eine Verdopplung von S die Kapazität C. Bei festem Material und Fläche halbiert eine Verdopplung von d die Kapazität. Eine Verformung, die d verändert, kann deshalb durch eine Kapazitätsänderung erkannt werden: Das ist das Prinzip eines kapazitiven Sensormodells. Kapazität ist nicht unmittelbar Druck, Position oder Feuchtigkeit; erforderlich sind eine Umrechnungsbeziehung und eine zum Gerät passende Kalibrierung. Rechnungen auf dem Papier beweisen nicht die Genauigkeit eines wirklichen Sensors.

Eigenständige Aufgabe. In einem fiktiven Modell, das Luft wie ein Vakuum behandelt, sind S = 20 cm², d = 1,0 mm und ε0 = 8,85 × 10⁻¹² F/m. Berechnen Sie C und danach seine Änderung bei einer Vergrößerung von d um 10 % und sonst konstanten Parametern. Bestimmen Sie schließlich die Wirkung auf die Zeitkonstante, wenn dieser Kondensator mit R = 10 MΩ im untersuchten idealen RC-Kreis verbunden wird.

Lösung. Die Umrechnung ergibt S = 20 × 10⁻⁴ m² = 2,0 × 10⁻³ m² und d = 1,0 × 10⁻³ m. Somit gilt C = 8,85 × 10⁻¹² × 2,0 = 1,77 × 10⁻¹¹ F oder 17,7 pF. Eine Vergrößerung von d um 10 % liefert C' = C/1,10, etwa 16,1 pF: Die relative Abnahme ist 9,09 %, nicht exakt 10 %. Berechnen Sie das Kehrwertverhältnis vor dem Runden. Die

ursprüngliche Zeitkonstante ist RC = 1,77 × 10⁻⁴ s oder 177 µs; auch sie wird bei der Kapazitätsänderung durch 1,10 geteilt.

Nur für eine kleine Änderung gilt bei konstanter Fläche und Permittivität ΔC/C ≈ −Δd/d. Diese Näherung erster Ordnung hilft, die Empfindlichkeit zu deuten, ist aber nicht die in der Aufgabe verwendete exakte Gleichheit. Ändert sich ε zusammen mit d, kann eine einzige Messung von C mehreren Ursachen entsprechen. Eine erkannte Änderung von einer bestimmten Ursache zu unterscheiden verhindert, einem Signal vorschnell eine eindeutige Eigenschaft zuzuweisen.

Quellen zu Beziehung und Prinzip, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: Universität Lille, Theorie der Plattenkondensatoren, https://tpmpathome.univ-lille.fr/capacites_condensateurs/version_papier/_papier.pdf ; amtliche Éduscol-Aufgabe mit einem kapazitiven Sensormodell, https://eduscol.education.gouv.fr/sites/default/files/document/22-pycj1nc1pdf-97374.pdf. Diese Aufgabe und ihre Zahlen sind eigenständig; weder Hochspannungsversuche noch die Übernahme einer Prüfungsaufgabe werden vorgeschlagen.

12. Wiederholung und Quellen

Stellen Sie eine RC-Differentialgleichung aus der Maschenregel und i = Cdu/dt auf. Prüfen Sie ihre Lösung durch Einsetzen und erklären Sie anschließend Anfangsbedingungen, Grenzwert und eine gewählte Schwelle. Wiederholen Sie Einheiten und Vorzeichenkonventionen vor dem Auswendiglernen der Ausdrücke. Derselbe Gedankengang dient später anderen Systemen mit exponentiellem Verlauf.

Schulischer Rahmen: veröffentlichter Lehrplan der Abschlussklasse, physikalischer Teil, https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm und Anhang https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf. Einheiten: BIPM, https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen. Kapitel, Bilanzen und Aufgaben sind eigenständige Texte von LFDP. Die Beispiele lehren weder netzgespeiste

Aufbauten noch Batteriehandhabung noch elektrische Sicherheitsverfahren; Theorie validiert keine Installation.

Kapitel 8 - Thermodynamik: einen Zustand von den ihn verändernden Übertragungen unterscheiden

Historischer Bezug - 1859: Strahlungsabsorption verschiedener Gase vergleichen

John Tyndall begann 1859 an der Royal Institution einen Apparat aufzubauen, um Absorption und Durchgang von Wärmestrahlung bei verschiedenen Gasen zu untersuchen. Die Institution bewahrt eine Röhre dieser Ausstattung und verbindet die Forschung mit der Rolle des Wasserdampfs im natürlichen Treibhauseffekt. Dieser Bezug schreibt nicht sämtliche Entwicklungsschritte der Klimawissenschaft einem einzigen Wissenschaftler zu. Er veranschaulicht einen für das Kapitel wichtigen Ansatz: die Strahlungseigenschaften der Medien unterscheiden, bevor eine Energiebilanz vervollständigt wird. Ein Gas darf nicht bei jeder Wellenlänge als gleichermaßen durchlässig angenommen werden.

Quelle des historischen Sachverhalts, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: Royal Institution, Darstellung von Tyndalls Apparat, https://www.rigb.org/explore-science/explore/collection/john-tyndalls-radiant-heat-apparatus. Eigenständige didaktische Einordnung von LFDP, ohne wörtliches Zitat oder übernommene Abbildung.

1. System und Austausche wählen

Die Thermodynamik beschreibt Systeme aus sehr vielen Teilchen durch makroskopische Größen. Temperatur, Druck, Volumen und Stoffmenge beschreiben einen Zustand, ohne jedes Teilchen zu verfolgen. Diese Beschreibung ersetzt nicht die mikroskopische Struktur; sie bietet eine andere, für Bilanzen und Zustandsänderungen geeignete Modellierungsebene.

Ein geschlossenes System tauscht keine Materie mit der Umgebung aus, kann aber Energie austauschen. Ein offenes System tauscht Materie aus; die zugehörigen Ströme verlangen eine vollständigere Bilanz. Ein isoliertes System tauscht im Modell weder Materie noch Energie aus. Ein adiabatisches System tauscht keine Energie durch Wärmeübertragung aus, kann aber Arbeit aufnehmen oder abgeben. Diese Begriffe sind keine Synonyme: Eine adiabatische Kompression kann die Temperatur verändern.

Zeichnen Sie vor jeder Gleichung die Grenze und benennen Sie, was sie durchqueren kann. Eine allein betrachtete Flüssigkeit, die durch einen Widerstand erhitzt wird, erhält von diesem eine Übertragung. Ein Gesamtsystem aus Flüssigkeit und Widerstand kann Energie als elektrische Arbeit aufnehmen. Das Gesamtergebnis muss stimmig bleiben, die Bilanzterme hängen jedoch von der gewählten Grenze ab. Eine Erhaltungsformel ohne definiertes System bleibt mehrdeutig.

2. Temperatur und innere Energie

Die thermodynamische Temperatur wird in Kelvin ausgedrückt. Ihr Zusammenhang mit Grad Celsius lautet T(K) = θ(°C) + 273,15. Ein Temperaturunterschied hat in Kelvin und Grad Celsius denselben Zahlenwert, ein Verhältnis thermodynamischer Temperaturen verlangt jedoch Kelvin. 40 °C als „doppelt so heiß“ wie 20 °C zu bezeichnen ergibt deshalb als thermodynamisches Verhältnis keinen Sinn.

Die innere Energie U beschreibt mikroskopische Beiträge, insbesondere Bewegung und Wechselwirkungen der Bestandteile. Sie unterscheidet sich von der kinetischen Energie der Gesamtbewegung und der potenziellen Energie der Gesamtposition. Ein ruhender Körper kann eine beträchtliche innere Energie besitzen. Eine makroskopische Geschwindigkeit misst nicht sämtliche molekulare Bewegung.

Temperatur ist keine Energiemenge. Zwei Systeme gleicher Temperatur können unterschiedliche Massen, Wärmekapazitäten und innere Energien besitzen. Auch Wärmeübertragung ist kein gespeicherter Stoff namens „Wärme“, sondern eine Art der Energieübertragung. Schreiben Sie, dass ein System durch Wärmeübertragung Energie aufnimmt und sich seine innere Energie ändert, statt dass es „eine Übertragung enthält“.

3. Das ideale Gas: eine Zustandsgleichung unter Bedingungen

Das ideale Gasmodell verbindet Absolutdruck p, Volumen V, Stoffmenge n und Temperatur T durch pV = nRT. Für Aufgaben kann R als 8,314 J/(mol·K) verwendet werden. Bei Druck in Pascal muss das Volumen in m³ angegeben sein. Ein Druck relativ zur Atmosphäre und eine Celsius-Temperatur können nicht unmittelbar in diese Beziehung eingesetzt werden.

Bei n = 0,10 mol, T = 300 K und V = 0,0020 m³ beträgt der berechnete Druck 0,10×8,314×300/0,0020 ≈ 1,25×10^5 Pa. Die Einheit stimmt wegen Pa·m³ = J. Verdoppelt sich V bei konstantem n und T, halbiert sich der Druck. Verdoppelt sich T bei konstantem n und V, verdoppelt sich der Druck; dabei handelt es sich jedoch um eine Verdopplung in Kelvin.

Das Modell vernachlässigt insbesondere gewisse Wechselwirkungseffekte und das Eigenvolumen der Teilchen. Es wird weniger geeignet, wenn diese Effekte wichtig sind, etwa nahe der Kondensation. Nehmen Sie nicht an, ein reales Gas erfülle dieses Gesetz bei jedem Druck und jeder Temperatur exakt. Zusätzliche amtliche Quelle: NASA Glenn, Zustandsgleichung, https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/equation-of-state/, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen.

4. Erster Hauptsatz und Vorzeichenkonvention

Für ein geschlossenes System kann eine allgemeine Bilanz $\Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = W + Q$ lauten, wobei W und Q die durch Arbeit beziehungsweise Wärmeübertragung empfangenen Energien sind. Sind die mechanischen Änderungen der Gesamtbewegung vernachlässigbar, gilt $\Delta U = W + Q$. Empfangene Energie ist in dieser Konvention positiv, an die Umgebung abgegebene negativ. Andere Konventionen existieren, müssen aber angegeben und beibehalten werden.

Arbeit und Wärmeübertragung hängen vom Weg der Zustandsänderung ab, die Änderung der inneren Energie dagegen vom Anfangs- und Endzustand. Zwei Vorgänge zwischen denselben Zuständen können verschiedene Arbeiten und Wärmeübertragungen umfassen, deren Summe dasselbe ΔU ergibt. Diese Unterscheidung zwischen Zustandsgröße und Übertragung steht im Zentrum der Bilanz; sie ist keine bloße sprachliche Feinheit.

Bei einer Expansion gegen konstanten Außendruck ist die vom System empfangene Arbeit $W = -p_{ext}(V_f - V_i)$ im angegebenen mechanischen Modell. Ändert sich das Volumen von 2,0 auf 4,0 Liter unter 100 000 Pa, beträgt $W = -200$ J. Empfängt das System gleichzeitig $Q = 500$ J, beträgt die Änderung seiner inneren Energie +300 J. Negative Arbeit bedeutet, dass das System bei der Expansion mechanische Energie an die Umgebung abgibt.

5. Wärmekapazität und Temperaturänderung

Für ein inkompressibles System der Masse m mit einer im untersuchten Bereich als konstant angenommenen spezifischen Wärmekapazität c lässt sich ohne Phasenwechsel $\Delta U = mc\Delta T$ schreiben. Die gesamte Wärmekapazität $C = mc$ hat die Einheit J/K, c die Einheit J/(kg·K). Das Symbol C bezeichnet hier trotz gleichen Buchstabens etwas anderes als die elektrische Kapazität des vorherigen Kapitels. Die Einheit kennzeichnet die verwendete Größe sofort.

Ist Wärmeübertragung der einzige maßgebliche Austausch, gilt $Q = mc\Delta T$. Wird zusätzlich elektrische oder mechanische Arbeit aufgenommen, muss sie berücksichtigt werden. Ein fiktiver Körper der Masse 0,20 kg mit $c = 1\,000$ J/(kg·K) empfängt ohne Verluste oder Phasenwechsel 4 000 J. Seine Temperatur steigt um $4\,000/(0{,}20\times1\,000) = 20$ K, also um 20 °C. Die doppelte Masse benötigte in diesem Modell für denselben Anstieg die doppelte Energie.

Die Wärmekapazität kann sich mit der Temperatur ändern. Die Formel mit konstantem c ist dann eine Näherung; eine genauere Rechnung kann eine von T abhängige Kapazität integrieren. Auch Gefäß, Verluste und Austausche mit der Luft sind wichtig. Eine ideale Abschätzung ist keine garantierte Heizdauer für ein reales Gerät.

6. Mischen und Phasenwechsel

Zwei Massen desselben Stoffes ohne Phasenwechsel und mit derselben konstanten spezifischen Wärmekapazität lassen sich durch eine isolierte Bilanz untersuchen. Werden Gefäß und Verluste vernachlässigt, gilt $m_1c(T_f - T_1) + m_2c(T_f - T_2) = 0$. Die Endtemperatur ist daher ein massengewichteter Mittelwert. Bei positiven Massen liegt sie zwischen den Anfangstemperaturen.

In einer Aufgabe ergeben 0,20 kg bei 60 °C und 0,30 kg bei 20 °C die Endtemperatur T_f = (0,20×60 + 0,30×20)/0,50 = 36 °C. Der einfache Mittelwert 40 °C wäre falsch, weil die Massen verschieden sind. Celsius kann für diese Rechnung mit Differenzen und gewichtetem Mittel verwendet werden, weil der gemeinsame Versatz 273,15 erhalten bleibt; das rechtfertigt nicht Celsius in Temperaturverhältnissen oder pV = nRT.

Bei einem Phasenwechsel unter gegebenem Druck kann Energie aufgenommen werden, ohne dass sich bei nebeneinander bestehenden Phasen die Temperatur ändert. Q = mL verwendet eine spezifische latente Wärme L. Für einen fiktiven Stoff mit L = 2,0×10^5 J/kg verlangt die Umwandlung von 0,10 kg im Modell 20 000 J. mcΔT beschreibt diese Phase nicht, weil sich die innere Energie anders als durch eine einfache Temperaturänderung verändert.

7. Drei Arten der Wärmeübertragung

Wärmeleitung überträgt Energie durch ein Medium, ohne zwingend eine makroskopische Gesamtbewegung von Materie zu verlangen. Konvektion verbindet den Austausch mit Fluidbewegung. Strahlung überträgt Energie durch elektromagnetische Wellen und kann ein Vakuum durchqueren. In realen Situationen bestehen mehrere Arten nebeneinander; sie im Modell zu trennen erlaubt die Prüfung ihrer Beiträge.

Für eine homogene ebene Wand mit Fläche A, Dicke e und Wärmeleitfähigkeit λ liefert ein stationäres eindimensionales Modell den Betrag der Wärmeübertragungsleistung P = λA|ΔT|/e. Der thermische Widerstand wird als R_th = e/(λA) in K/W definiert. Somit ist P = |ΔT|/R_th. In diesem Fall fließt Energie ohne einen zusätzlich aufgeprägten Mechanismus spontan von der wärmeren zur kälteren Seite.

Bei e = 0,10 m, λ = 0,050 W/(m·K), A = 2,0 m² beträgt R_th = 1,0 K/W. Bei einer Differenz von 20 K beträgt die Leistung 20 W. Eine Verdopplung der Dicke halbiert sie im Modell. Kontakte, Wärmebrücken, Temperaturänderungen und Oberflächenaustausche können eine reale Wand beeinflussen. Eine einfache Formel bestimmt nicht die vollständige Leistung eines Gebäudes.

8. Strahlung und absolute Temperaturen

Ein grauer Strahler kann die ausgestrahlte Leistung P = εσAT^4 liefern, mit dem Emissionsgrad ε zwischen null und eins in diesem Modell, der Stefan-Boltzmann-Konstante σ und der absoluten Temperatur T. Für den Austausch mit einer idealen Umgebung bei T_env lautet eine vereinfachte Nettoleistung εσA(T^4 − T_env^4), unter geeigneten geometrischen und strahlungsbezogenen Annahmen. Die vierte Potenz verlangt Kelvin, niemals Grad Celsius.

Mit ε = 0,80, A = 0,10 m², T = 400 K, T_env = 300 K und σ ≈ 5,67×10^−8 W/(m²·K^4) beträgt die veranschaulichende Nettoleistung etwa 79,4 W. Das bedeutet nicht, dass jede reale Oberfläche bei dieser Temperatur denselben Emissionsgrad oder Austausch besitzt. Medium, andere Oberflächen und Spektrum können eine genauere Beschreibung verlangen.

Werte physikalischer Konstanten lassen sich beim NIST prüfen: https://physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt, Tabelle für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen. Die gerundeten Werte oben dienen den Aufgaben. Das Strahlungsmodell erinnert daran, warum eine kleine relative Temperaturzunahme die Leistung merklich ändern kann, ohne allein die Temperatur eines vollständigen Systems vorherzusagen.

9. Abkühlen im Kontakt mit einem Wärmereservoir

Ein phänomenologisches newtonsches Modell kann die empfangene Leistung als P = −hA(T − T_ext) schreiben, bei konstant angenommenem hA und einer Umgebung mit konstanter Temperatur T_ext. Für ein System mit gesamter Wärmekapazität C gilt C dT/dt = −hA(T − T_ext). Die Lösung ist T(t) = T_ext + (T_0 − T_ext)e^(−t/τ) mit τ = C/(hA). Die Temperaturdifferenz nimmt exponentiell ab, nicht die absolute Temperatur selbst.

Für einen fiktiven Körper anfangs bei 80 °C in einer Umgebung bei 20 °C und mit τ = 10 min beträgt die Temperatur nach einer Zeitkonstante 20 + 60/e ≈ 42,1 °C. Um höchstens 30 °C zu erreichen, muss 60e^(−t/τ) ≤ 10 gelten, also t ≥ τ ln(6) ≈ 17,9 min. Diese Zahlen beschreiben eine ideale Kurve, keine Anleitung zum Handhaben oder Berühren eines heißen Körpers.

Die Gleichung ähnelt der eines RC-Kreises. Der Vergleich betrifft die mathematische Struktur: Ein Abstand vom Endzustand nimmt mit einer charakteristischen Zeit ab. Die Mechanismen werden dadurch nicht identisch. Abkühlen kann Strahlung, Verdunstung oder veränderliches h umfassen; auch das Wärmereservoir kann sich verändern. Eine exponentielle Anpassung muss anhand der Beobachtungen und Annahmen erörtert werden.

10. Erhaltung und Richtung von Zustandsänderungen

Der erste Hauptsatz verlangt eine Energiebilanz, entscheidet allein aber nicht, welche Vorgänge spontan ablaufen. Zwei isolierte Körper tauschen im üblichen untersuchten Fall thermische Energie nicht spontan so aus, dass der wärmere noch wärmer und der kältere noch kälter wird. Die Entwicklungsrichtung verlangt zusätzliche Information, die durch den zweiten Hauptsatz und die Entropie ausgearbeitet wird. Diese Vertiefung wird genannt, damit vom ersten Hauptsatz keine Schlussfolgerung verlangt wird, die er nicht liefert.

Eine Wärmepumpe kann Energie von einem kälteren zu einem wärmeren Medium übertragen, indem sie Arbeit empfängt. Liefert sie 600 J an die warme Seite und erhält 200 J Arbeit, kann sie in einer idealen Bilanz 400 J der kalten Seite entnehmen. Das Verhältnis 600/200 = 3 ist kein Wirkungsgrad zur Energieerzeugung: Es vergleicht die nutzbar gelieferte Wärme mit der aufzubringenden Arbeit, während der andere Eingang aus dem kalten Medium stammt.

Die Leistungszahl kann also eins überschreiten, ohne der Erhaltung zu widersprechen. Sie ist vom Wirkungsgrad als Nutzenergie geteilt durch sämtliche empfangene Energie zu unterscheiden. Temperaturbedingungen und reale Eigenschaften setzen weitere Grenzen. Dieses fiktive Beispiel belegt keine Geräteleistung.

11. Eine vereinfachte Strahlungsbilanz und ihre Grenzen

Für eine Kugel im solaren Strahlungsfluss S beträgt die auffangende Fläche πR², ihre gesamte Oberfläche dagegen 4πR². Bei Albedo a ist die ideale absorbierte Leistung (1 − a)SπR². Strahlt sie als gleichmäßig temperierter schwarzer Körper, ergibt das Gleichgewicht 4πR²σT^4 = (1 − a)SπR², also T = [(1 − a)S/(4σ)]^(1/4).

Mit den veranschaulichenden Parametern S = 1 360 W/m² und a = 0,30 ergibt sich etwa 255 K. Der Radius kürzt sich. Diese Temperatur gehört zum vereinfachten Strahlungsmodell und ist nicht automatisch die tatsächliche mittlere Oberflächentemperatur. Atmosphäre, wellenlängenabhängige Absorption und Emission, Zirkulation, Tag-Nacht-Wechsel und Temperaturverteilung werden nicht beschrieben. Ein Mittelwert von T^4 ist nicht exakt die vierte Potenz eines Mittelwerts von T.

Die Rechnung hilft, die Struktur einer Bilanz und die Rolle der Albedo zu verstehen. Sie ist keine Klimavorhersage. Ein reichhaltigeres Modell muss die einbezogenen Austausche und Schichten nennen. Ein vereinfachter Wert kann aufschlussreich sein, wenn gesagt wird, was er erfasst; er wird irreführend, wenn er als direkte Messung des gesamten Erde-Atmosphäre-Systems dargestellt wird.

Vertiefung - Treibhauseffekt und Grenze der Strahlungsbilanz

Die erwärmte Erdoberfläche emittiert vorwiegend Infrarotstrahlung. Einige atmosphärische Gase, insbesondere Wasserdampf und Kohlendioxid, absorbieren und emittieren in Bändern dieses Bereichs. Ein Teil der von der Atmosphäre emittierten Strahlung gelangt zum Boden. Diese Übertragung trägt zu einer höheren Oberflächentemperatur als in einem Modell bei, in dem Strahlung direkt ins All entweichen würde. Die Atmosphäre ist also keine Wand, die jede Energieabgabe verhindert: Sie beteiligt sich an Strahlungsaustauschen und anderen Übertragungen.

Die Bilanz am Oberrand der Atmosphäre vergleicht die vom gesamten Erde-Atmosphäre-System absorbierte Sonnenenergie mit seiner Abstrahlung ins All. Die Oberflächenbilanz enthält zusätzlich empfangene atmosphärische Strahlung sowie

Austausche durch Konvektion und Verdunstung. Diese Grenzen zu vermischen zählt eine interne Übertragung als neue Energie von außen. Absorption mit anschließender Emission erzeugt keine Energie. Diese Unterscheidungen erklären, warum die 255 K des vorherigen Modells nicht automatisch die mittlere Oberflächentemperatur sind.

Eine theoretische Vertiefung auf dem Papier: Wir nehmen eine schwarze Oberfläche und eine ideale Atmosphärenschicht an, die für Sonnenstrahlung durchlässig ist, die infrarote Oberflächenstrahlung jedoch vollständig absorbiert. Konvektion und Verdunstung werden vernachlässigt; F bezeichnet den tatsächlich von der Oberfläche absorbierten mittleren solaren Fluss. Die Schicht emittiert σT_a^4 nach oben und denselben Fluss nach unten. Ihre Bilanz verlangt σT_s^4 = 2σT_a^4. Für die Oberfläche gilt F + σT_a^4 = σT_s^4. Daraus folgen σT_a^4 = F und σT_s^4 = 2F. Der Fluss ins All bleibt F, gleich dem eintretenden Fluss; die zusätzliche Übertragung nach unten ist systemintern.

Eigenständige Aufgabe. Berechnen Sie für F = 240 W/m² und σ = 5,67 × 10⁻⁸ W·m⁻²·K⁻⁴ die beiden Modelltemperaturen. Was geschieht mit der Bilanz, wenn der ausgehende Fluss ins All fälschlich durch σT_s^4 ersetzt wird? Lösung: T_a = (F/σ)^(1/4) ≈ 255 K und T_s = (2F/σ)^(1/4) ≈ 303 K. Ihr Verhältnis beträgt 2^(1/4), etwa 1,189. σT_s^4 als ausgehenden Fluss zu verwenden ergäbe 480 W/m² und überginge die Schicht, die diese Strahlung absorbiert, bevor sie selbst ins All emittiert. Die scheinbare Differenz zeigt keinen Erhaltungsverstoß, sondern eine schlecht definierte Grenze.

Dieses Einschichtmodell ist bewusst stark vereinfacht: Die reale Atmosphäre absorbiert je nach Wellenlänge verschieden, besitzt ein Temperaturprofil und tauscht auch durch Bewegung und Phasenwechsel Energie aus. Die berechneten Werte sind weder

Messungen des aktuellen Klimas noch Projektionen. Der Ansatz zeigt einen Mechanismus und die Erhaltung; allein quantifiziert er weder die Wirkung einer tatsächlichen Gaskonzentration noch eines Zukunftsszenarios.

Qualitative Quellen und Quellen zu den Bilanzgrenzen, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: NASA Science, Strahlungshaushalt, https://science.nasa.gov/ems/13_radiationbudget/ ; Erde-Atmosphäre-Energiebilanz, https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/climate-and-earths-energy-budget/. Das graue Einschichtmodell, seine Herleitung und die Aufgabe oben sind eigenständige didaktische Ausarbeitungen von LFDP; keine NASA-Abbildung oder Klimadatenreihe wird übernommen.

12. Aufgaben mit Lösungen und Wiederholung

A - Vorzeichen der Arbeit. Ein Gas wird von 3 auf 2 Liter unter konstantem Außendruck von 100 000 Pa komprimiert. **Lösung:** W = −p_extΔV = +100 J. Bei Q = −40 J ist ΔU = +60 J. Die Kompression führt dem System trotz Wärmeabgabe Arbeit zu.

B - Temperatur. Die Temperatur steigt von 20 auf 40 °C. **Lösung:** Sie steigt von 293,15 auf 313,15 K; das Verhältnis beträgt etwa 1,068, nicht 2. Die Differenz beträgt 20 K und 20 °C. Differenz und Verhältnis sind unterschiedliche Operationen.

C - Abkühlen. Wie lange dauert es im Exponentialmodell, den Abstand zur Umgebung zu halbieren? **Lösung:** e^(−t/τ) = 1/2 liefert t = τ ln(2), etwa 0,693τ. Diese Zeit betrifft die Differenz T − T_ext, nicht die Halbierung einer gesamten Celsius-Temperatur.

D - Phasenwechsel. Wärmeübertragung wird ohne Temperaturänderung aufgenommen. **Lösung:** Das verlangt nicht Q = 0. Ein Phasenwechsel kann bei den angegebenen Bedingungen Energie absorbieren, während die Temperatur konstant bleibt. mcΔT reicht dann als Modell nicht aus.

Nennen Sie zur Wiederholung System, Austausche, Vorzeichenkonvention und Gültigkeitsbereich. Unterscheiden Sie innere Energie, Temperatur und

Übertragung. Stellen Sie eine Bilanz und danach eine zeitabhängige Gleichung auf; prüfen Sie Einheiten und Grenzwert. Veröffentlichter amtlicher Rahmen der Abschlussklasse: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm, Anhang https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf. Eigenständige LFDP-Texte, Rechnungen und Aufgaben ohne übernommenen Text, übernommene Abbildung oder gefährliches Verfahren.

Kapitel 9 - Wellen: Ausbreitung, Frequenz, Intensität und Dopplerverschiebung

Historischer Bezug - 1842: Frequenz hängt auch von Relativbewegung ab

Die Universität Wien datiert Christian Dopplers erste Beschreibung des heute nach ihm benannten Phänomens auf 1842. Dieser historische Bezug verbindet die Begriffe des Kapitels mit einer physikalischen Frage: Warum müssen eine periodische Quelle und das empfangene Signal nicht dieselbe Frequenz besitzen? Das Datum eines Vorschlags validiert nicht sämtliche späteren Anwendungen. Eine heutige Rechnung verlangt weiterhin die Angabe von Medium, Bewegungsrichtung und Vorzeichenkonvention; eine akustische Formel wird nicht allein durch Umbenennung der Welle für Licht anwendbar.

Quelle des historischen Sachverhalts, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: Universität Wien, Geschichte der Physik, erster Teil, https://physik.univie.ac.at/en/about-us/history/part-1/. Eigenständige didaktische Einordnung von LFDP, ohne wörtliches Zitat oder übernommene Abbildung.

1. Eine sich ausbreitende Störung

Eine Welle beschreibt die Ausbreitung einer Störung und kann Energie transportieren. Eine mechanische Welle benötigt ein materielles Medium. Die örtliche Auslenkung seiner Elemente darf nicht mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Störung verwechselt werden. In einem einfachen Saitenmodell kann ein Punkt vertikal schwingen, während sich die Verformung horizontal ausbreitet. Er legt nicht mit der Welle den Weg entlang der ganzen Saite zurück.

Eine Welle ist transversal, wenn die Störung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung ist, und longitudinal bei parallelen Richtungen. Schall in einem Gas wird durch Druckänderungen und örtliche longitudinale Auslenkungen beschrieben. Elektromagnetische Wellen benötigen kein materielles Medium, um sich im Vakuum auszubreiten. Die Kategorien benennen Mechanismen; sie behaupten nicht, jede Welle verhalte sich gleich.

Das elementare Modell setzt keinen mit dem Energietransport identischen Gesamttransport von Materie voraus. Komplexere Phänomene können eine Nettoverschiebung oder Strömung umfassen; „keine Welle transportiert jemals Materie“ wäre zu absolut. Auf diesem Niveau unterscheiden wir lediglich örtliche Auslenkung, Transport der Störung und mögliche Gesamtbewegung des Mediums.

2. Verzögerung und Ausbreitungsgeschwindigkeit

Breitet sich eine Störung formtreu mit konstanter Geschwindigkeit c aus, beobachten zwei entlang der Ausbreitung im Abstand d liegende Punkte dasselbe Signal mit der Verzögerung τ = d/c. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hat die Einheit m/s, die Verzögerung ist eine positive Dauer. Ein Signal am zweiten Punkt kann als s_2(t) = s_1(t − τ) beschrieben werden, wenn Zeitkonventionen und Ausbreitungsrichtung stimmig sind.

Bei d = 1,70 m und c = 340 m/s in einer Schallaufgabe beträgt die Verzögerung 0,0050 s oder 5,0 ms. Dies ist ein einfacher Hinweg. Für ein nach Reflexion an einem Hindernis im Abstand d am Emissionspunkt empfangenes Echo beträgt der ideale Weg 2d und die Verzögerung 2d/c. Die Geometrien zu verwechseln halbiert oder verdoppelt den berechneten Abstand.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt vom Medium und seinen Bedingungen ab, im Allgemeinen nicht von der

Quellengeschwindigkeit. Eine beim Sprechen gehende Person schiebt nicht sämtliche Schallwellen mit ihrer eigenen Geschwindigkeit. Ihre Bewegung verändert die Abstände zwischen empfangenen Wellenfronten und führt zum Dopplereffekt; die Ausbreitung durch das Medium wird weiterhin mit dessen passender Wellengeschwindigkeit beschrieben.

3. Periodendauer, Frequenz und Wellenlänge

Bei einer periodischen Welle ist die Periodendauer T die Zeit zwischen aufeinanderfolgenden gleichen Zuständen an einem Punkt. Die Frequenz f = 1/T gibt die Anzahl der Zyklen pro Sekunde an und wird in Hertz ausgedrückt. Die Wellenlänge λ ist bei einfacher periodischer Ausbreitung der Abstand zweier Punkte gleichen Phasenzustands zu einem bestimmten Zeitpunkt. In diesem Modell gilt λ = cT = c/f.

Ein Signal mit der Frequenz 1 000 Hz und der Ausbreitungsgeschwindigkeit 340 m/s besitzt die Wellenlänge 0,340 m und die Periodendauer 1,00 ms. Die doppelte Frequenz im selben nichtdispersiven Medium ergibt die halbe Wellenlänge. Die Periodendauer ist eine Zeit, die Wellenlänge eine Strecke. Diagramme gegen Zeit und gegen Position müssen deshalb anhand verschiedener Achsen gelesen werden.

An einer ruhenden Grenzfläche zweier Medien bleibt die von der Quelle vorgegebene Frequenz im untersuchten Übertragungsmodell im Allgemeinen gleich, während sich Ausbreitungsgeschwindigkeit und Wellenlänge ändern können. Eine größere Geschwindigkeit im zweiten Medium ergibt bei dieser Frequenz eine größere Wellenlänge. Reflexion und Transmission können nebeneinander bestehen; eine einzelne Wellenlänge beschreibt bei mehreren vorhandenen Wellen nicht das gesamte Feld.

4. Eine sinusförmige Welle schreiben und die Phase deuten

Eine in positiver x-Richtung laufende Welle kann als s(x,t) = A cos(ωt − kx + φ) geschrieben werden, mit ω = 2πf und k = 2π/λ. Die Amplitude A trägt die Einheit der gestörten Größe, die Phase ist dimensionslos. Das Verhältnis ω/k ergibt im Modell die Phasengeschwindigkeit. Ein Wechsel des Vorzeichens vor kx kehrt bei beibehaltenen Konventionen die Ausbreitungsrichtung um.

An einem festen Ort wird eine zeitliche Schwingung beobachtet, zu einem festen Zeitpunkt ein räumliches Profil. Zwei um λ getrennte Punkte haben dieselbe Phase; zwei um λ/2 getrennte Punkte sind bei einem Sinus gegenphasig. Das bedeutet nicht, dass die materiellen Elemente durch eine konstante Strecke ihrer eigenen Bewegung getrennt wären; es beschreibt die Ordnung des Signals.

Bleibt die Phase konstant und wächst die Zeit um Δt, wächst die Position um (ω/k)Δt. Richtung und Geschwindigkeit lassen sich somit ohne Auswendiglernen eines isolierten Vorzeichens wiederfinden. Diese Kontrolle hilft bei einer anderen Konvention mit cos(kx − ωt). Weil der Kosinus gerade ist, können die Formen bei passender Phase gleichwertig sein; prüfen Sie den gesamten Ausdruck.

5. Intensität und Leistungsverteilung

Die mittlere Intensität einer Welle kann als transportierte Leistung pro Fläche in W/m² definiert werden. Bei einer idealen isotropen Punktquelle in einem Medium ohne Absorption verteilt sich die Leistung P auf eine Kugelfläche von 4πr². Die Intensität im Abstand r ist daher P/(4πr²). Sie nimmt mit wachsender Verteilungsfläche ab, ohne dass im Modell Gesamtleistung dissipiert wird.

Verdoppelt sich der Abstand, wird die Intensität durch vier geteilt. Aus einer fiktiven Intensität von 10^−6 W/m² bei 2 m ergeben sich unter denselben Bedingungen 2,5×10^−7 W/m² bei 4 m. Wenden

Sie dieses geometrische Gesetz nicht ungeprüft nahe einer ausgedehnten Quelle, in einem hallenden Raum oder in einem absorbierenden Medium an. Auch Richtwirkung kann die Leistung in bestimmten Richtungen konzentrieren.

Absorption ist ein anderer Mechanismus: Ein Teil der Wellenenergie geht auf das Medium über. Ein Dämpfungsgesetz kann dann einen zusätzlichen, von Abstand und Frequenz abhängigen Faktor enthalten. Unterscheiden Sie geometrische Verteilung und Dissipation. Beide verringern die gemessene Intensität, beschreiben aber verschiedene Übertragungen.

6. Logarithmischer Pegel und Quellenaddition

Der Schallintensitätspegel wird durch L = 10log_10(I/I_0) in Dezibel definiert, mit dem in üblichen Aufgaben verwendeten Bezugswert I_0 = 10^−12 W/m². Das Verhältnis ist dimensionslos. Bei I = 10^−6 W/m² beträgt es 10^6 und L = 60 dB. Der Pegel wird nicht wie die Intensität addiert, und sein Wert allein beschreibt keine reale Exposition oder Schutzmaßnahme ausreichend.

Eine Verdopplung der Intensität addiert 10log_10(2) ≈ 3,01 dB. Eine Verzehnfachung addiert 10 dB. Im kugelförmigen Modell ohne Absorption verringert eine Abstandsverdopplung den Pegel um 10log_10(4) ≈ 6,02 dB. Diese Differenzen sind bei denselben Annahmen und demselben Bezugswert unabhängig vom Anfangspegel.

Bei unabhängigen Quellen, deren Intensitäten addiert werden können, ergeben vier gleiche Quellen die vierfache Intensität und etwa 6,02 dB mehr als eine allein. Ihre vier Pegel zu addieren wäre falsch. Bei kohärenten Wellen gehen Amplituden und Phasen in die Interferenz ein; einfache Intensitätsaddition ist nicht mehr die allgemeine Beschreibung. Das nächste Kapitel präzisiert diese Bedingung.

Der Zusammenhang zwischen Amplitude und Intensität hängt von Größe und Medium ab. Bei einer linearen Welle im selben Medium kann die Intensität proportional zum Quadrat der Druck- oder Auslenkungsamplitude sein. Eine Verdopplung dieser Amplitude vervierfacht dann die Intensität, statt sie zu verdoppeln. Pegel sind keine universelle Anleitung zum Gehörschutz; Dauer, Spektrum und Expositionsbedingungen bleiben erforderlich.

7. Dopplerverschiebung bei bewegter Quelle

Die Dopplerverschiebung ist ein Unterschied zwischen ausgesendeter und empfangener Frequenz durch Relativbewegung in der untersuchten Geometrie. Bei einer Schallquelle, die sich einem im Medium ruhenden Beobachter nähert, liegen aufeinanderfolgende Wellenfronten enger zusammen. Im geradlinigen Unterschallmodell gilt f_received = f_emitted c/(c − v_s), mit v_s positiv zum Beobachter und kleiner als c.

Die Formel lässt sich herleiten. Während einer ausgesendeten Periode T_emitted rückt die erste Front um cT_emitted vor und die Quelle um v_sT_emitted. Der Abstand zweier Fronten vor ihr beträgt (c − v_s)T_emitted. Der ruhende Beobachter empfängt die Fronten mit der Geschwindigkeit c; die Frequenz ist c geteilt durch diese Wellenlänge. Die Formel folgt aus Geometrie und Periodendauer, nicht aus einer willkürlichen Änderung der Eigenfrequenz der Quelle.

Mit f_emitted = 440 Hz, c = 340 m/s und v_s = 20 m/s beträgt die empfangene Frequenz bei Annäherung 467,5 Hz. Bei Entfernung wächst die Wellenlänge, und die Formel wird zu 440×340/(340 + 20), etwa 415,6 Hz. Die Verschiebungen sind nicht exakt symmetrisch um 440, weil die Quellengeschwindigkeit im Nenner steht.

8. Ein bewegter Beobachter und elektromagnetische Wellen

Bei einer ruhenden Quelle und einem Beobachter, der sich im Medium mit v_o nähert, trifft dieser die Fronten mit der Geschwindigkeit c + v_o. Im einfachen geradlinigen Fall beträgt die empfangene Frequenz f_emitted(c + v_o)/c. Quellen- und Beobachterbewegung ergeben bei Schall also nicht dieselben Formeln, weil das Medium den Ausbreitungsrahmen vorgibt.

Nähern sich Quelle und Beobachter unter der angegebenen Konvention, werden die Faktoren kombiniert: f_received = f_emitted(c + v_o)/(c − v_s). Bei einer nicht entlang der Sichtlinie gerichteten Geschwindigkeit sind die maßgeblichen Komponenten und eine genaue Geometrie nötig. Den gesamten Geschwindigkeitsbetrag ungeprüft in eine radiale Formel einzusetzen kann die Verschiebung überschätzen.

Für Licht im Vakuum verlangen die vollständigen Beziehungen eine relativistische Beschreibung, die vom akustischen Modell mit Medium verschieden ist. Bei radialer Geschwindigkeit klein gegenüber c liefert eine Näherung für das Entfernen Δλ/λ ≈ v_r/c, wobei v_r beim Entfernen positiv ist. Behalten Sie Vorzeichen und Näherungsbereich bei. Die Beziehung erfasst weder hohe Geschwindigkeiten noch jedes Phänomen einer spektralen Verschiebung.

9. Überlagerung und stehende Wellen

In einem linearen Modell können sich zwei Störungen durch Addition ihrer Werte überlagern. Zwei Wellen gleicher Frequenz und Amplitude in entgegengesetzten Richtungen können eine stehende Welle erzeugen. Manche Punkte bleiben Knoten mit Amplitude null; andere sind Bäuche mit maximaler Amplitude. Eine stehende Welle ist nicht eine einzelne laufende Welle, die sich insgesamt in einer Richtung fortbewegt.

Für eine ideale Saite der Länge L mit festen Enden erzwingen die Bedingungen Knoten an den Endpunkten. Die erlaubten Wellenlängen sind $\lambda_n = 2L/n$ und die Frequenzen $f_n = nc/(2L)$ für ganze Zahlen $n \geq 1$. Diese Beziehungen hängen von den Randbedingungen ab; ein System mit einem freien Ende hat andere Moden. Das Wort „harmonisch“ erspart daher nicht die Systemdefinition.

Bei $L = 0{,}50$ m und $c = 100$ m/s in einer Aufgabe beträgt die Grundfrequenz 100 Hz und die Frequenz der dritten Mode 300 Hz. In dieser Mode liegen drei halbe Wellenlängen auf der Saite. Unterscheiden Sie Modennummer, Knotenzahl und Zahl der Bäuche. Die Endpunkte sind Knoten; die dritte Mode hat zwei innere Knoten und drei Bäuche.

10. Zusammengesetzte Signale, Schwebungen und Digitalisierung

Ein reines Signal ist im Modell sinusförmig. Ein zusammengesetztes Signal kann mehrere Frequenzen enthalten. Die Summe $A\cos(2\pi\times400t) + 0{,}5A\cos(2\pi\times800t)$ ist periodisch, aber kein einzelner Sinus. Das Spektrum beschreibt Komponenten und ihre Amplituden. Signalform und Grundperiode allein liefern nicht jedes Detail des Spektrums.

Zwei Sinusschwingungen mit nahen Frequenzen, beispielsweise 440 und 442 Hz, können Schwebungen erzeugen. Die Kosinus-Summenformel zeigt eine schnelle Schwingung mit einer Hüllkurve. Die Frequenz der beobachteten Amplitudenschwebungen ist die absolute Differenz, hier 2 Hz. Das bedeutet nicht, dass eine neue materielle Quelle mit 2 Hz hinzugefügt wurde; es folgt aus Überlagerung und sich verändernder Relativphase.

Für die Digitalisierung eines auf die maximale Frequenz f_max begrenzten Signals ist eine Abtastfrequenz größer als 2f_max eine grundlegende Bedingung der idealen Rekonstruktion, bei geeigneten Annahmen zur Bandbegrenzung und Verarbeitung. Liegt eine Komponente außerhalb dieses Bereichs, kann Aliasing sie bei einer anderen Frequenz erscheinen lassen. Beispielsweise liefern Kosinussignale mit 700 und 300 Hz zu Zeitpunkten, die Vielfache von 1/1 000 s sind, dieselben Werte. Die abgetasteten Daten allein können sie dann ohne weitere Information nicht unterscheiden.

11. Aufgaben mit Lösungen

A - Echo. Ein Echo wird nach 0,20 s in einem Modell mit c = 340 m/s empfangen. **Lösung:** Der Hin- und Rückweg beträgt 68 m, das Hindernis ist 34 m entfernt. Das Echo entspricht keinem einfachen Hinweg von 68 m zum Hindernis.

B - Wellenlänge. Eine Welle hat T = 0,020 s und c = 3,0 m/s. **Lösung:** f = 50 Hz und λ = 0,060 m. Die Frequenz hängt von der Periodendauer ab; die Wellenlänge verwendet zusätzlich die Ausbreitungsgeschwindigkeit. c mit f zu multiplizieren ergäbe keine Länge.

C - Pegel. Die Intensität wird mit 1 000 multipliziert. **Lösung:** Der Pegel steigt um 10log_10(1 000) = 30 dB. Der Anfangspegel wird nicht mit 1 000 multipliziert. Eine logarithmische Skala übersetzt ein Verhältnis in eine Differenz.

D - Doppler. Eine Schallquelle entfernt sich von einem ruhenden Empfänger. **Lösung:** Im vorgestellten Unterschallmodell ist die empfangene Frequenz niedriger. Leiten Sie das Vorzeichen aus den weiter auseinanderliegenden Fronten her, statt es ohne Geometrie auswendig zu lernen.

E - Moden. Eine ideale Saite besitzt die Grundfrequenz 80 Hz. **Lösung:** Ihre harmonischen Moden liegen bei 80, 160, 240 Hz usw. unter denselben Randbedingungen. Eine andere Endbedingung verlangt eine andere Beziehung; das Ergebnis gilt nicht universell für jedes Instrument.

12. Wiederholung und Reichweite

Unterscheiden Sie die Bewegung des Mediums von der Ausbreitung, lesen Sie eine Periodendauer aus einem Zeitsignal und eine Wellenlänge aus einem räumlichen Profil. Leiten Sie den akustischen Dopplereffekt anhand der Frontabstände her. Gehen Sie bei Intensität und Pegel vor jeder Addition auf die Definitionen zurück. Prüfen Sie auch Linearität, Stationarität und geometrische Bedingungen.

Veröffentlichter amtlicher Rahmen der Abschlussklasse, Bereich Wellen und Signale: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm und Anhang https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen. Eigenständige Erklärungen und Aufgaben von LFDP ohne übernommene fremde Aufnahme, Abbildung oder Aufgabe. Akustische Werte sind Aufgabenparameter, keine örtliche Messung, Expositionsbewertung oder Schutzanweisung.

Kapitel 10 - Optik: Beugung, Interferenz, Bilder und Fernrohre

Historischer Bezug - 1801: eine Theorie des Lichts erörtern

Das Archiv der Royal Society bewahrt den Text von Thomas Youngs Vortrag über die Theorie des Lichts und der Farben auf, gehalten am 12. November 1801; die zugehörige Abhandlung erschien 1802. Vortrag und Veröffentlichung zu unterscheiden verhindert, dass zwei nahe Jahreszahlen als Widerspruch behandelt werden. Der Bezug begleitet die Wellenbeschreibung: Ein Lichtmuster zu erklären verlangt den Vergleich von Phasen und Amplituden, nicht nur das Zeichnen von Strahlen. Die Formeln und Aufgaben dieses Kapitels sind heutige didaktische Ausarbeitungen; sie bauen weder den historischen Apparat nach noch übersetzen sie sein Manuskript.

Quelle des historischen Sachverhalts, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: Royal Society, Archiv L&P/11/172, https://makingscience.royalsociety.org/items/l-and-p_11_172/paper-on-the-theory-of-light-and-colours-bakerian-lecture-by-thomas-young. Eigenständige didaktische Einordnung von LFDP, ohne wörtliches Zitat oder übernommene Abbildung.

1. Verschiedene Modelle für verschiedene Fragen

Licht lässt sich durch Strahlen beschreiben, um Bilder zu untersuchen, wenn die Geräteabmessungen gegenüber der Wellenlänge groß und die geometrischen Annahmen geeignet sind. Für Beugung und Interferenz wird eine Wellenbeschreibung notwendig. Eine Photonenbeschreibung erläutert bestimmte Energieaustausche mit Materie. Diese Modelle sind nicht drei nach Vorliebe auswählbare Meinungen; jedes beantwortet Fragen und hat einen Gültigkeitsbereich.

Ein Strahl stellt in der geometrischen Optik eine Ausbreitungsrichtung dar, keinen materiellen Lichtfaden. Einige Strahlen zu zeichnen konstruiert ein Bild, beschreibt allein aber nicht die umgebende Intensitätsverteilung. Eine endliche Öffnung kann einen Beugungsfleck erzeugen, selbst wenn die ideale geometrische Zeichnung Strahlen in einem Punkt zusammenführt. Die geforderte Genauigkeit bestimmt das nötige Modell.

Dieses Kapitel behandelt idealisierte Geräte und Rechnungen auf dem Papier. Wellenlängen, Abmessungen und Brennweiten sind Aufgabendaten. Die Formeln zertifizieren keine reale optische Qualität. Für das Verständnis sind weder ein Blick in die Sonne noch Laserexposition noch ein riskanter optischer Aufbau nötig.

2. Beugung an einer Öffnung

Beugung ist eine Änderung der Ausbreitung, wenn eine Welle auf eine Öffnung oder ein Hindernis trifft. Sie wird besonders sichtbar, wenn die maßgebliche Abmessung mit der Wellenlänge vergleichbar ist. Eine Welle setzt sich daher nicht immer als geometrisches, strikt durch die Ränder begrenztes Bündel fort. Im untersuchten Wellenmodell setzt das Phänomen keine zufällige Ablenkung unabhängiger Photonen an jeder Kante voraus.

Bei einem Spalt der Breite b, beleuchtet durch eine monochromatische Welle, erfüllt das erste Beugungsminimum im Fernfeldmodell $\sin(\theta) = \lambda/b$. Für kleine Winkel in Radiant gilt $\theta \approx \lambda/b$. θ ist der Halbwinkel zwischen der zentralen Achse und diesem ersten Minimum. Die Winkelbreite des Hauptmaximums beträgt etwa $2\lambda/b$. Halbwinkel und Gesamtbreite zu verwechseln führt einen Faktor zwei ein.

Auf einem Schirm im Abstand D beträgt die zentrale Breite bei kleinen Winkeln $\ell \approx 2\lambda D/b$. Bei $\lambda = 500$ nm, $b = 80$ µm und $D = 1{,}0$ m folgt $\ell \approx 0{,}0125$ m oder 12,5 mm. Die Umrechnung ergibt

500×10^−9 m und 80×10^−6 m. Ein halb so breiter Spalt erzeugt im Modell ein doppelt so breites Hauptmaximum; auch eine längere Wellenlänge vergrößert die Aufweitung.

3. Eine Beugungsmessung deuten

Sind Formel und Bedingungen geeignet, lässt sich eine unbekannte Breite mit b ≈ 2λD/ℓ abschätzen. Messen Sie die zentrale Breite zwischen den ersten Minima, statt beliebig zwei sichtbare helle Bereiche auszuwählen. Monochromatisches Licht, Geometrie und Abstände beeinflussen die Eignung des Modells. Licht mit mehreren Wellenlängen überlagert mehrere Muster und kann die Messung erschweren.

Bei λ = 600 nm, D = 2,0 m und ℓ = 24 mm beträgt die geschätzte Breite 100 µm. Eine Verdopplung des gemessenen ℓ bei sonst gleichen Parametern halbierte b. Diese Abhängigkeit ermöglicht eine qualitative Kontrolle vor der Rechnung. Eine negative Breite ist unmöglich; ein Ergebnis weit außerhalb der Geräteabmessungen verlangt die Prüfung der Einheiten, der Definition von ℓ und der Annahmen.

Unsicherheiten in D, λ und ℓ beeinflussen b. Ist die gemessene Breite ungenau, macht eine zusätzliche Nachkommastelle beim Abstand b nicht automatisch genau. Geben Sie eine Abschätzung mit zur Datenlage passender Genauigkeit an. Das Modell selbst kann die wichtigste Grenze sein, wenn die Winkel nicht mehr klein sind oder das Fernfeld noch nicht erreicht ist.

4. Überlagerung und Phasendifferenz

Zwei überlagerte sinusförmige Wellen derselben Frequenz ergeben ein Resultat, das von ihrer Phasendifferenz abhängt. Bei Gangunterschied δ und anfänglich gleichphasigen Quellen im selben Medium gilt $\Delta\varphi = 2\pi\delta/\lambda$ bis auf eine Vorzeichenkonvention. Bei verschiedenen Anfangsphasen wird diese Differenz hinzugefügt; der Abstand allein beschreibt die Interferenz dann nicht mehr.

Konstruktive Interferenz bedeutet, dass sich die Störungen verstärken. Bei zwei gleichen Amplituden und $\Delta\varphi = 2m\pi$ wird die resultierende Amplitude verdoppelt. Vollständig destruktive Interferenz entspricht $\Delta\varphi = (2m + 1)\pi$ und kann bei gleichen Amplituden die örtliche Störung aufheben. Für anfänglich gleichphasige Quellen lauten die Wegbedingungen dann $\delta = m\lambda$ und $\delta = (m + 1/2)\lambda$.

Bei ungleichen Amplituden führt Gegenphase nicht zwingend zur vollständigen Aufhebung. Für ein stabiles Muster ist außerdem Kohärenz nötig, hier eine während der Beobachtung hinreichend stabile Phasendifferenz. Zwei unabhängige Quellen können ihre Relativphase zu schnell ändern; der gemittelte Interferenzterm kann dann verschwinden. Intensitäten und Amplituden zu addieren ist nicht austauschbar.

5. Intensität und Energieerhaltung

Für Licht setzt die folgende skalare Beziehung neben Kohärenz Beiträge mit gleicher Polarisation voraus; orthogonale Polarisationen erzeugen diesen Interferenzterm nicht. Im geeigneten linearen Modell ergeben zwei Wellen mit den Intensitäten I_1 und I_2 örtlich $I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos(\Delta\varphi)$. Besitzt jede die Intensität I_0, wird daraus $4I_0\cos^2(\Delta\varphi/2)$. Das örtliche Maximum ist $4I_0$, das Minimum null. Zwei inkohärente Wellen gleicher Intensität ergäben unter den üblichen Additionsbedingungen im Mittel $2I_0$.

Das höhere örtliche Maximum erzeugt keine Energie, und das Minimum vernichtet keine. Das Muster verteilt die Energie unter den Bedingungen der Anordnung räumlich um. Ein dunkler und ein heller Bereich dürfen nicht als zwei unabhängige Systeme untersucht werden, denen jeweils die gesamte Anfangsenergie zugeordnet wird. Die Erhaltung wird durch eine geeignete Bilanz des Gesamtsystems und seiner Ströme geprüft.

Die Beziehung zeigt auch, warum es bei Interferenz falsch wäre, zwei Dezibelpegel zu addieren. Arbeiten Sie mit den Amplituden oder Intensitäten und Phasen des Modells; wenden Sie anschließend die Pegeldefinition an, falls diese Darstellung verlangt wird. Gleiche Frequenz genügt nicht: Stabile Relativphase und Geometrie bleiben wichtig.

6. Interferenz zweier Öffnungen

In einer idealen Anordnung zweier kohärenter Öffnungen im Abstand a mit einem entfernten Schirm bei D und einer achsennahen Koordinate x beträgt der Gangunterschied näherungsweise $\delta \approx ax/D$. Bei anfänglich gleichphasigen Quellen sind die Maxima deshalb durch den Streifenabstand $i \approx \lambda D/a$ getrennt. Die Näherungen verlangen insbesondere einen gegenüber a großen Abstand und hinreichend kleine Winkel.

Mit $\lambda = 600$ nm, $D = 2{,}0$ m und $a = 0{,}20$ mm beträgt der Streifenabstand 0,0060 m oder 6,0 mm. Ein größeres a verringert ihn, ein weiter entfernter Schirm vergrößert ihn. Diese Abhängigkeit unterscheidet sich von der Beugungsbreite einer Öffnung der Breite b. a und b haben unterschiedliche Rollen und dürfen nicht in den Formeln vertauscht werden.

Ein reales Doppelspaltmuster zeigt häufig Interferenzstreifen, die von einer Beugungshüllkurve moduliert werden. Die Streifen drücken den Gangunterschied zwischen den Öffnungen aus; die Hüllkurve hängt von jeder einzelnen endlichen Öffnung ab. Nur eines davon zu beschreiben kann in einem Bereich nützlich sein, bildet aber nicht die gesamte Intensitätsverteilung ab.

Wird i zur Schätzung von λ gemessen, gilt $\lambda \approx ia/D$. Über mehrere Streifenabstände zu mitteln kann einen Lokalisierungsfehler verringern: Zehn Abstände zu messen und durch zehn zu teilen ist häufig stabiler als die Messung eines einzelnen. Kalibrierungsfehler oder eine ungeeignete geometrische Annahme verschwinden dadurch nicht. Wiederholbarkeit verbessern und systematische Fehler korrigieren sind verschiedene Ziele.

7. Auflösungsgrenzen: Ein Bild unterscheidet nicht jedes Detail

Eine endliche Öffnung verbreitert das Bild eines Punkts zu einem Fleck statt einem perfekten mathematischen Punkt. Zwei Körper mit sehr kleinem Winkelabstand können überlappende Flecken erzeugen. Ein größerer Öffnungsdurchmesser kann bei gegebener Wellenlänge die beugungsbegrenzte Auflösung verbessern; Aberrationen, Sensor und Atmosphäre können jedoch andere Grenzen setzen.

Als erläuternde Vertiefung liefert ein übliches Kriterium für eine kreisförmige Öffnung im idealen Beugungsmodell einen charakteristischen Winkel von etwa 1,22λ/D_aperture. Diese Zahl hängt vom gewählten Kriterium und der Öffnungsgeometrie ab; sie verspricht keine reale Fernrohrqualität. D_aperture bezeichnet nicht den Schirmabstand des vorigen Abschnitts.

Ein Bild zu vergrößern erzeugt keine Details, die nicht aufgelöst wurden. Ein stark vergrößertes Bild kann unscharf bleiben. Unterscheiden Sie Vergrößerung, Auflösung und Helligkeit. Das schützt vor einer vereinfachten Deutung kommerziell beworbener Vergrößerungszahlen, ohne dass zum Verständnis des Modells ein Instrument getestet werden müsste.

8. Eine dünne Linse und die Vorzeichenkonvention

Wählen Sie für eine dünne Sammellinse eine Achse in Lichtausbreitungsrichtung und das optische Zentrum O. Die bildseitige Brennweite f' = OF' ist positiv. Die vorzeichenbehaftete Linsengleichung lautet 1/OA' − 1/OA = 1/f'. Für einen realen Gegenstand links ist OA negativ; ein reales Bild rechts besitzt positives OA'. Die Vorzeichen gehören zu gerichteten Positionen, nicht allein zum Wort „Abstand“.

Der Abbildungsmaßstab ist γ = A'B'/AB = OA'/OA. Ein negatives Vorzeichen zeigt ein umgekehrtes Bild an; der Betrag vergleicht die Größen. Ein reales Bild kann im Modell auf einem Schirm entstehen, weil Strahlen tatsächlich zusammenlaufen. Ein virtuelles Bild entspricht sich schneidenden Strahlverlängerungen; dasselbe Bündel projiziert es nicht auf einen Schirm an dieser Position.

Mit f' = 0,10 m und OA = −0,30 m ergibt die Beziehung 1/OA' = 10 − 3,333... = 6,666..., also OA' = 0,15 m. Der Abbildungsmaßstab beträgt −0,50. Das Bild ist real, umgekehrt und halb so groß. OA durch den positiven Abstand 0,30 m zu ersetzen würde die Gleichung verändern und eine mit der Konvention unvereinbare Antwort liefern.

9. Grenzfälle und geometrische Konstruktion

Bei einem Gegenstand im Unendlichen in einer bestimmten Richtung sind die einfallenden Strahlen näherungsweise parallel, und das Bild entsteht in der bildseitigen Brennebene. Ein achsenparalleler Strahl geht nach einer idealen Sammellinse durch den bildseitigen Brennpunkt; ein Strahl durch das optische Zentrum wird in der Dünnlinsennäherung nicht abgelenkt. Diese Regeln erlauben eine Konstruktion, sofern eine unmaßstäbliche Zeichnung nicht als exakte Messung behandelt wird.

Liegt der Gegenstand im gegenstandsseitigen Brennpunkt, treten die Strahlen parallel aus, und das Bild liegt im Modell im Unendlichen. Liegt der reale Gegenstand zwischen Brennpunkt und Linse, wird das Bild virtuell und aufrecht. Bei f' = 0,10 m und OA = −0,050 m ergeben sich OA' = −0,10 m und γ = +2. Das Bild liegt auf der Gegenstandsseite und ist vergrößert.

Die Dünnlinsengleichung wird unter paraxialen Bedingungen verwendet: Strahlen ausreichend nahe der Achse und mäßige

Winkel bei geeignetem Linsenmodell. Große Winkel oder eine weite Öffnung können Aberrationen sichtbar machen. Beugung begrenzt das Bild weiterhin, auch wenn das geometrische Modell richtig gelöst wurde. Eine Rechnung mit der Linsengleichung beantwortet eine Frage zur idealen Position und Größe, nicht jeden Aspekt der Instrumentenqualität.

10. Ein afokales Fernrohr und seine Winkelvergrößerung

Ein ideales astronomisches Fernrohr lässt sich durch zwei Sammellinsen modellieren, Objektiv und Okular. Bei einem Gegenstand im Unendlichen erzeugt das Objektiv ein Zwischenbild in seiner bildseitigen Brennebene. Im afokalen Fernrohr fällt diese Ebene mit der gegenstandsseitigen Brennebene des Okulars zusammen. Die Strahlen treten dann parallel aus; im einfachen Modell beträgt der Linsenabstand f'_objective + f'_eyepiece.

Die vorzeichenbehaftete Winkelvergrößerung lautet G = θ'/θ = −f'_objective/f'_eyepiece bei kleinen Winkeln und der gewählten Konvention. Das Minuszeichen entspricht einem umgekehrten Bild. Bei einer Objektivbrennweite von 200 mm und einer Okularbrennweite von 25 mm beträgt der ideale Abstand 225 mm und G = −8. Der Vergrößerungsbetrag ist acht; er vergleicht Winkel, nicht unmittelbar die Bildhöhe mit der Höhe eines Gegenstands in endlichem Abstand.

Ein größerer Objektivdurchmesser kann mehr Licht sammeln und eine beugungsbedingte Auflösungsgrenze verbessern, ändert aber allein nicht dieses Brennweitenverhältnis. Ein Okular verändert die Vergrößerung; es stellt verlorene Information nicht automatisch wieder her. Unterscheiden Sie bei einer mündlichen Fernrohrerklärung Strahlengang, Zwischenbild, afokale Bedingung und Vergrößerung.

11. Brechung, Frequenz und Wellenlänge

Der Brechungsindex eines Mediums kann für eine monochromatische Lichtwelle als n = c_0/v_phase definiert werden, mit c_0 als Ausbreitungsgeschwindigkeit im Vakuum. An einer ruhenden Grenzfläche bleibt die Frequenz im Übertragungsmodell gleich, während die Wellenlänge λ_medium = λ_vacuum/n wird. Eine mit der Frequenz verbundene Farbe wird deshalb nicht einfach zu einer anderen Farbe, weil die Wellenlänge im Medium verändert wurde.

Das Brechungsgesetz lautet n_1sin(θ_1) = n_2sin(θ_2), mit Winkeln zum Lot auf die Grenzfläche. Ohne Umrechnung von der Oberfläche aus zu messen ist ein Geometriefehler. Bei n_2 > n_1 wird der gebrochene Strahl in der üblichen Geometrie zum Lot hin gebrochen. Reflexionsrichtung und Amplitude verlangen weiterhin eigene Beziehungen.

Totalreflexion ist möglich, wenn eine Welle vom höheren zum niedrigeren Brechungsindex übergeht und der Einfallswinkel einen Grenzwinkel mit sin(θ_limit) = n_2/n_1 überschreitet. Diese Bedingung gilt nicht in Gegenrichtung. Sie zeigt die Bedeutung der Medienreihenfolge. Der Brechungsindex kann von der Wellenlänge abhängen; Dispersion erklärt gewisse Richtungsunterschiede zwischen Komponenten mehrfarbigen Lichts.

12. Aufgaben mit Lösungen

A - Zentrale Breite. λ = 400 nm, b = 0,10 mm und D = 2,0 m. **Lösung:** $\ell \approx 2\lambda D/b = 0{,}016$ m oder 16 mm. Der Halbwinkel beträgt etwa 0,004 rad. Eine Breite von 8 mm würde den Faktor zwei auslassen.

B - Streifenabstand. Eine ideale Anordnung besitzt i = 3,0 mm, a = 0,50 mm und D = 2,5 m. **Lösung:** λ ≈ ia/D = 6,0×10^−7 m oder 600 nm. Beide Größen in Millimetern werden vor der Multiplikation

in Meter umgerechnet. Die berechnete Wellenlänge hängt von Kleinwinkel- und Kohärenzannahmen ab.

C - Phase. Zwei anfänglich gleichphasige Wellen haben einen Gangunterschied von 3λ/2. **Lösung:** $\Delta\varphi = 3\pi$, gleichwertig mit π modulo 2π: Die Interferenz ist destruktiv. Vollständig null wird sie im Modell nur bei gleichen Amplituden.

D - Bild. f' = 0,20 m und OA = −0,40 m. **Lösung:** 1/OA' = 5 − 2,5 = 2,5, also OA' = 0,40 m und γ = −1. Das Bild ist real, umgekehrt und gleich groß. Gleiche Größe bedeutet nicht gleiche Orientierung.

E - Fernrohr. Ein afokales Fernrohr hat Brennweiten von 300 und 30 mm. **Lösung:** Der ideale Abstand ist 330 mm, die vorzeichenbehaftete Vergrößerung −10. Die Umkehrung folgt aus dem Modell mit zwei Sammellinsen; ein anderes bildaufrichtendes System würde die Beschreibung ändern.

F - Brechungsindex. Eine Welle gegebener Frequenz mit der Vakuumwellenlänge 600 nm tritt in ein Medium mit dem Brechungsindex 1,5 ein. **Lösung:** Ihre Wellenlänge dort ist 400 nm; die Frequenz bleibt an der ruhenden Grenzfläche gleich. Die Phasengeschwindigkeit wird durch 1,5 geteilt.

13. Wiederholung und Quellen

Bestimmen Sie zur Wiederholung zuerst das Phänomen: Beugung an einer Öffnung, Interferenz zwischen Beiträgen, Bildentstehung durch eine Linse oder Fernrohrvergrößerung. Schreiben Sie dann seine spezifischen Abmessungen und Konventionen auf. Verwechseln Sie weder Spaltbreite und Spaltabstand noch Winkel und Schirmlänge noch Abbildungsmaßstab und Winkelvergrößerung. Eine beschriftete Darstellung kann lehrreicher als eine isolierte Formel sein.

Veröffentlichter amtlicher Rahmen der Abschlussklasse: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm und Anhang https://cache.media.education.gouv.fr/file/SPE8_MENJ_25_7_2019/92/9/spe249_annexe_1158929.pdf, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen. Der Abschnitt zur Auflösung einer Kreisöffnung ist als Vertiefung gekennzeichnet; der Leitfaden übernimmt nicht sämtliche Prüfungsanordnungen. Eigenständige LFDP-Erklärungen und -Aufgaben ohne fremde Lehrbuchfotos, Zeichnungen oder Zitate. Die Rechnungen sind keine Aufbauanleitung oder optische Sicherheitsanweisung.

Kapitel 11 - Photonen, Energieniveaus und Umwandlung von Licht

Historischer Bezug - 1905 und 1921: ein Gesetz für den Photoeffekt

Die Darstellung der Nobelstiftung verbindet Einsteins Arbeit von 1905 mit der Erklärung des Photoeffekts durch Lichtquanten. Der Physikpreis für 1921, im folgenden Jahr überreicht, nennt insbesondere das Gesetz dieses Effekts. Er darf daher nicht als Preis für die allgemeine Relativitätstheorie beschrieben werden. Vor allem hilft der Bezug, einen Wechsel der Fragestellung zu verstehen: Eine höhere Intensität ersetzt im Einzelphotonenmodell nicht zwingend die individuelle Energie, die zum Herauslösen eines Elektrons erforderlich ist. Die Rechnung muss Energien vergleichen, statt Strahlleistung und Frequenz zu verwechseln.

Quelle des historischen Sachverhalts, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: NobelPrize.org, Darstellung zum Licht und den Nobelarchiven, https://www.nobelprize.org/prizes/physics/the-dual-nature-of-light-as-reflected-in-the-nobel-archives/. Eigenständige didaktische Einordnung von LFDP, ohne wörtliches Zitat oder übernommene Abbildung.

1. Warum mehrere Lichtbeschreibungen notwendig sind

Das vorherige Kapitel beschrieb eine Lichtwelle durch Wellenlänge, Phase und Interferenz. Diese Darstellung erklärt Streifenmuster und Auflösungsgrenzen. Sie reicht jedoch nicht aus, jede Art des Energieaustauschs zwischen Licht und Materie zu erfassen. Wenn ein Detektor Licht empfängt, kann Energie in einzelnen Ereignissen übertragen werden. Ein Photon ist das mit dieser elektromagnetischen Wechselwirkung verbundene Quant. Ersetzen Sie eine nützliche Theorie nicht durch eine gegensätzliche Parole: Die untersuchten Phänomene bestimmen die maßgeblichen Größen und das Modell.

Ein Photon ist keine kleine klassische Kugel, deren Bahn in jeder Interferenzanordnung folgenlos verfolgt werden könnte. Eine Lichtwelle ist ebenso wenig ein materieller Stoff, der wie Wasser fließt. Bilder können eine erste Erklärung unterstützen; sie werden unbrauchbar, wenn ihnen modellfremde Eigenschaften zugeschrieben werden. Eine gute Antwort unterscheidet Messung, Rechnung und didaktische Darstellung.

Dieser Leitfaden verwendet Photonenenergie zur Untersuchung von Übergängen zwischen Energieniveaus, des Photoeffekts und einiger Umwandlungsbilanzen. Er entwickelt keine vollständige Quantenmechanik. Zahlenbeispiele atomarer Niveaus und Materialien sind, sofern nicht anders angegeben, fiktiv. Sie ermöglichen das Argumentieren, ohne ein vereinfachtes Schema als Eigenschaft eines wirklichen Bauteils auszugeben.

2. Energie, Frequenz und Wellenlänge im Vakuum

Für Strahlung mit der Frequenz ν beträgt die Photonenenergie:

$E = h\,\nu = h\,c_0 / \lambda_0$.

Die Planck-Konstante h beträgt im Internationalen Einheitensystem exakt 6,626 070 15 × 10^{-34} J·s, die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 exakt 299 792 458 m·s^{-1}. λ_0 kennzeichnet die Vakuumwellenlänge. Frequenz und Wellenlänge sind durch $c_0 = \lambda_0 \nu$ verbunden. Die Formel führt keine drei unabhängigen Parameter ein: Einer der beiden spektralen Parameter genügt, um den anderen und anschließend die Energie zu berechnen.

Die Dimension von h ν ist J·s multipliziert mit s^{-1}, also eine Energie. Bei der Wellenlänge 600 nm ergibt die vorherige Umrechnung $\lambda_0 = 600 \times 10^{-9}$ m. Es folgen etwa 3,31 × 10^{-19} J pro Photon. Diese sehr kleine Zahl beschreibt ein einzelnes Ereignis; sie bedeutet nicht, eine Quelle mit vielen Photonen transportiere vernachlässigbare Energie.

Beim Übergang in ein transparentes Medium ändern sich Ausbreitungsgeschwindigkeit und Wellenlänge des Lichts; die Frequenz bleibt an einer ruhenden Grenzfläche erhalten. Bei Brechungsindex n ist die Wellenlänge im Medium $\lambda = \lambda_0/n$. λ_0 in h c_0/λ durch diese verkürzte Wellenlänge zu ersetzen wäre falsch: Es würde dem Photon ohne entsprechenden Mechanismus eine mit n multiplizierte Energie zuweisen. Am sichersten wird mit h ν gerechnet, oder mit h c_0/λ_0, wenn die Vakuumwellenlänge ausdrücklich angegeben ist.

Ein Photon besitzt Ruhemasse null und Energie ungleich null. Daraus darf nicht durch Anwendung des klassischen Ausdrucks m $v^2/2$ mit Masse null auf Energie null geschlossen werden. Dieser Ausdruck gehört zu einem anderen physikalischen Bereich. Stimmiges Argumentieren hängt auch von den Gültigkeitsbereichen der Beziehungen ab.

3. Das Elektronenvolt: Energieeinheit, keine Spannung

Das Elektronenvolt eignet sich für Energien mikroskopischer Phänomene. Ein Elektronenvolt entspricht exakt 1,602 176 634 × 10^{-19} J. Das Symbol eV darf nicht mit Volt verwechselt werden, der Einheit einer Potenzialdifferenz. Ihr Zusammenhang entsteht durch die Energie, die mit der Bewegung einer Elementarladung durch eine Potenzialdifferenz von einem Volt verbunden ist. Energie und Spannung behalten dennoch verschiedene Dimensionen.

Um Joule in Elektronenvolt umzurechnen, wird durch den Joulewert eines Elektronenvolts geteilt. Das Photon von 600 nm hat somit etwa 2,07 eV Energie. Um umgekehrt 3,0 eV in Joule umzurechnen, wird mit 1,602 × 10^{-19} multipliziert: Das Ergebnis liegt bei 4,81 × 10^{-19} J. Den vollständigen Umrechnungsfaktor aufzuschreiben verhindert die willkürliche Wahl der Rechenrichtung.

Eine praktische Abkürzung, sofern ihre Einheiten beibehalten werden, lautet:

E in eV ≈ 1 240 / Vakuumwellenlänge in nm.

Die Zahl 1 240 ist ein gerundeter Wert von h c_0 in eV·nm. Sie ist keine neue unabhängige Konstante. Bei 400 nm beträgt die Energie etwa 3,10 eV, bei 800 nm etwa 1,55 eV. Eine Verdopplung der Wellenlänge halbiert die Photonenenergie. Dieser Vergleich erlaubt eine unmittelbare Kontrolle jeder spektralen Rechnung.

4. Strahlleistung und Photonenzahlen

Leistung misst die pro Zeit übertragene Energie. In einem monochromatischen Strahlmodell gilt P = Ṅ E, wenn jedes Photon die Energie E trägt und der mittlere Photonenstrom Ṅ ist. Somit lässt sich Ṅ = P/(h ν) schreiben. Das sagt nicht, dass Photonen in regelmäßigen Abständen eintreffen; es liefert eine mit der betrachteten Leistung vereinbare mittlere Rate.

Eine fiktive Quelle hat die optische Leistung 2,0 mW bei 500 nm im Vakuum. Die Einzelenergie liegt bei $3{,}97 \times 10^{-19}$ J. Die mittlere Rate beträgt deshalb etwa $5{,}03 \times 10^{15}$ Photonen pro Sekunde. Einer Millisekunde entsprechen im Mittel etwa $5{,}03 \times 10^{12}$ Photonen. Das veranschaulicht den Gegensatz zwischen mikroskopischer Energie und makroskopischem Fluss, ohne jedes Ereignis vorstellen zu müssen.

Bei einer Quelle mit mehreren Wellenlängen ist es nicht exakt, die Gesamtleistung durch die Energie eines beliebig gewählten Photons zu teilen. Die Leistung muss nach dem Spektrum verteilt, die Beiträge berechnet und addiert werden. Manchmal ist eine monochromatische Näherung möglich, sie muss aber genannt und anhand der verlangten Genauigkeit geprüft werden.

Eine höhere Leistung bei fester Frequenz erhöht in diesem Modell die Photonenrate; sie verändert nicht die Energie jedes Photons. Eine höhere Frequenz erhöht die Einzelenergie, die Gesamtleistung hängt jedoch auch von der Photonenzahl ab. Farbe und Leistung sind deshalb keine gleichwertigen Ausdrücke für „Lichtmenge“.

5. Ein Energieniveauschema lesen

Ein Schema zeigt die erlaubten Energiezustände eines Systems. Die vertikale Lage bezeichnet die Energie, häufig in Elektronenvolt. Gezeichnete Abstände sind nur quantitativ, wenn der Maßstab es ist. Berechnen Sie bei einem Übergang zunächst die Differenz zwischen End- und Anfangsenergie, statt sofort eine Spektralformel zu suchen.

Betrachten wir fiktive Niveaus von -5 eV und -2 eV. Ein Übergang vom ersten zum zweiten erhöht die Systemenergie um 3 eV. Im Modell der Absorption eines einzelnen Photons muss das Photon diese Differenz liefern. Die entsprechende Vakuumwellenlänge beträgt etwa 413 nm. Der umgekehrte Übergang kann ein Photon

derselben Energie erzeugen, wenn der betrachtete Übergang strahlend ist.

Negative Niveauenergien machen die Photonenenergie nicht negativ. Sie bezeichnen den gewählten Energiebezug, etwa die Energie eines ungebundenen Zustands in einem Modell. Die übertragene Energie hängt von der Differenz ab, und diese ist für das emittierte Photon positiv. Werden sämtliche Niveauenergien um dieselbe Konstante verschoben, bleiben die Übergänge erhalten.

Die Energieübereinstimmung allein garantiert keinen beobachtbaren Übergang. Auswahlregeln, Besetzungen der Zustände, Wechselwirkungen und Messbedingungen sind bei realen Systemen wichtig. Eine einfache Aufgabe verwendet als möglich angegebene Übergänge. Die Deutung eines wirklichen Spektrums verlangt Quellen zur jeweiligen Spezies und zum untersuchten Gerät.

Ein Linienspektrum kann Übergänge kennzeichnen; es ist nicht immer ein eindeutiges, von allen Bedingungen unabhängiges Etikett. Spektrometerauflösung, Mischungen, Linienverbreiterung und tatsächlich besetzte Niveaus verändern die Deutung. Wissenschaftliches Vorgehen verlangt mehrere zusammenpassende Hinweise, keine einzelne optische Ähnlichkeit.

6. Das Energiemodell des Photoeffekts

Der Photoeffekt ist die Emission von Elektronen infolge der Wechselwirkung von Strahlung mit einem Material unter geeigneten Bedingungen. Im elementaren Modell erhält ein Elektron die Energie eines Photons; ein Teil überwindet die durch die Austrittsarbeit Φ gekennzeichnete Barriere. Die maximale kinetische Energie der emittierten Elektronen ist dann:

K_max = h ν − Φ, wenn h ν mindestens gleich Φ ist.

„Maximal“ ist erforderlich: Nicht sämtliche Elektronen treten mit identischer Energie aus. Ihre Zustände und Verluste vor der Emission können verschieden sein. Die Gleichung beschreibt die Energiegrenze des Modells, kein Gesetz mit derselben Geschwindigkeit für jedes detektierte Elektron.

Für ein fiktives Material mit der Austrittsarbeit 2,2 eV und Licht von 400 nm liegt die Photonenenergie bei 3,10 eV. Die Differenz liefert $K_{max} \approx 0{,}90$ eV, etwa $1{,}44 \times 10^{-19}$ J. Eine nichtrelativistische Näherung ergäbe $v_{max} = \sqrt{(2\,K_{max}/m_e)}$, etwa $5{,}6 \times 10^{5}$ m·s^{-1}. Diese Geschwindigkeit bleibt klein gegenüber c_0 und macht die Näherung in diesem Beispiel stimmig.

Die Grenzfrequenz ist $\nu_{threshold} = \Phi/h$. Auch eine Grenzwellenlänge im Vakuum lässt sich definieren: $\lambda_{threshold} = h\,c_0/\Phi$. Bei $\Phi = 2{,}2$ eV liegt sie nahe 564 nm. Im Einzelphotonenbereich liefert eine kürzere Wellenlänge ausreichend Energie, eine längere nicht.

Bei 700 nm beträgt die Einzelenergie nur etwa 1,77 eV und liegt unter der fiktiven Austrittsarbeit. Einfach die Photonenzahl zu erhöhen ersetzt im Modell nicht die fehlende Energie jedes Photons. Daraus darf keine universelle Aussage über sämtliche experimentellen Bereiche werden: Multiphotonenmechanismen können bei bestimmten Intensitäten auftreten, liegen jedoch außerhalb des hier untersuchten Modells.

7. Ein Versuch, der Frequenz und Intensität unterscheidet

Um eine Beziehung zu prüfen, verändern Sie einen Parameter und kontrollieren die anderen. Bei fester Frequenz oberhalb der Schwelle kann ein höherer Photonenfluss die Zahl emittierter Elektronen pro Zeit erhöhen, sofern weder Material noch Erfassung gesättigt sind. Er verändert K_max in der elementaren Gleichung nicht unmittelbar. Bei geeigneter Intensität verändert dagegen eine Frequenzänderung das vorhergesagte Energiemaximum.

Eine Spannung entgegen der Elektronenbewegung kann die maximale Energie abschätzen. Der positive Betrag der Gegenspannung, U_a, erfüllt K_max = e U_a. Das Elektron trägt die Ladung −e; Potenzialvorzeichen in einem Schema hängen von dessen Orientierung ab. Positives U_a zu verwenden verhindert, eine Schaltungskonvention in negative kinetische Energie umzudeuten.

Bei K_max ≈ 0,90 eV wird im Idealmodell eine Gegenspannung vom Betrag etwa 0,90 V erwartet. Diese numerische Entsprechung verwendet die Definition des Elektronenvolts. Sie rechtfertigt nicht, experimentelle Effekte zu vernachlässigen: Kontaktpotenziale, Streulicht, Reststrom und Ablesegenauigkeit müssen in einer realen Auswertung berücksichtigt werden.

K_max in Joule gegen ν in Hertz aufzutragen liefert theoretisch die Steigung h und den Achsenabschnitt −Φ. Bei Energie in eV hat die Steigung die Einheit eV·s, nicht J·s. Ihre Einheit zu erkennen ist entscheidend für die Verwendung eines Diagramms oder den Vergleich zweier Messungen.

8. Photovoltaische Umwandlung und richtige Bilanzen

Eine photovoltaische Zelle wandelt einen Teil der empfangenen Lichtenergie in nutzbare elektrische Energie um. Ihre vollständige Funktion verlangt ein ausführlicheres Material- und Ladungstransportmodell als den einfachen Photoeffekt. Für eine makroskopische Bilanz können einfallende Leistung und abgegebene elektrische Leistung dennoch verglichen werden, sofern Fläche und Bedingungen angegeben sind.

Eine fiktive Fläche von 0,020 m² erhält eine Bestrahlungsstärke von 500 W·m⁻². Ist das unter den angegebenen geometrischen Bedingungen die von der Fläche empfangene Bestrahlungsstärke, beträgt die einfallende Leistung 10 W. Bei elektrischer Nutzleistung von 1,8 W ist der Wirkungsgrad bezogen auf die einfallende Energie 18 %. Weitere 8,2 W verteilen sich je nach System auf Reflexion, mögliche Transmission, Erwärmung und andere Verluste.

Angenommen, 80 % der einfallenden Leistung werden tatsächlich absorbiert. Die absorbierte Leistung beträgt dann 8 W. Der daraus in Elektrizität umgewandelte Anteil beträgt 22,5 %. Die Prozentwerte widersprechen sich nicht: Ihre Nenner sind verschieden. Ein Wirkungsgrad ohne Systemgrenze oder Energiebezug kann irreführen, selbst wenn die Rechnung exakt ist.

Beleuchtungsstärke in Lux lässt sich nicht durch eine einzige für jede Quelle gültige einfache Konstante in Leistung in Watt umrechnen. Lux berücksichtigt die menschliche Sehreaktion je nach Spektrum. Watt misst Energie pro Sekunde. Ein Quellenvergleich verlangt die Festlegung, ob Sehwahrnehmung, Strahlungsleistung oder Umwandlungswirkungsgrad bewertet werden.

9. Aufgaben mit Lösungen und Fehlerdiagnose

Aufgabe A. Strahlung hat die Vakuumwellenlänge 620 nm. Berechnen Sie die Photonenenergie in Joule und Elektronenvolt. Die Antwort beträgt etwa $3{,}20 \times 10^{-19}$ J oder 2,00 eV. Ein Wert von 2,00 J verwechselte den Zahlenwert in eV mit jenem in Joule; $3{,}20 \times 10^{-28}$ J deutete wahrscheinlich auf eine vergessene Nanometerumrechnung hin.

Aufgabe B. Ein Systemmodell besitzt die Niveaus −4,0 eV, −2,5 eV und −1,0 eV. Welche Energien könnten den Differenzen entsprechen? Positive Differenzen sind 1,5 eV und 3,0 eV. Zwei verschiedene Übergänge können folglich dieselbe Differenz von 1,5 eV aufweisen. Diese Liste allein beweist nicht, dass jeder Übergang erlaubt oder beobachtbar ist.

Aufgabe C. Ein fiktives Material hat $\Phi = 2{,}5$ eV. Genügt ein Photon von 500 nm im Einzelphotonenmodell? Seine Energie liegt bei 2,48 eV, noch etwas unter der Schwelle. Zu früh auf 2,5 eV zu runden würde den verlangten Unterschied löschen. Die Grenzwellenlänge liegt bei 496 nm. Die Aufgabe erinnert daran, dass eine für eine allgemeine Darstellung passende Näherung nahe einer Schwelle unzureichend werden kann.

Aufgabe D. Eine monochromatische Quelle liefert 3,0 mJ bei 600 nm. Schätzen Sie die gesamte mit dieser Energie verbundene Photonenzahl. Dividieren Sie $3{,}0 \times 10^{-3}$ J durch $3{,}31 \times 10^{-19}$ J: Es folgen etwa $9{,}1 \times 10^{15}$ Photonen. Das Ergebnis ist eine dimensionslose Zahl, keine Frequenz. Eine Rate würde die Emissionsdauer benötigen.

Aufgabe E. Erzeugen Quellen bei 800 nm und 400 nm bei gleicher optischer Leistung dieselbe Photonenrate? Das Photon von 400 nm trägt die doppelte Energie. Seine entsprechende Rate ist deshalb bei gleicher Leistung innerhalb der monochromatischen Näherung

halb so groß. Eine allein auf sichtbarer Farbe beruhende Antwort wäre unzureichend.

Vertiefung - Radioaktiver Zerfall, Aktivität und Halbwertszeit

Radioaktivität ist die spontane Umwandlung instabiler Kerne mit Strahlungsemission. Der Zerfallszeitpunkt eines bestimmten Kerns lässt sich nicht durch einen deterministischen Countdown vorhersagen. Eine große Population erlaubt dennoch ein statistisches Zerfallsmodell. Für ein Radionuklid im einfachen untersuchten Rahmen ist die Halbwertszeit die Dauer, nach der sich die mittlere Zahl der verbleibenden Mutterkerne halbiert hat. Das bedeutet nicht, dass jeder Kern nach zwei Halbwertszeiten verschwunden ist.

Betrachten wir die Anfangspopulation $N0$ ohne neu hinzukommende Mutterkerne und die Zerfallskonstante $\lambda > 0$. Das mittlere Modell erfüllt $dN/dt = -\lambda N$. Seine Lösung ist $N(t) = N0 \exp(-\lambda t)$ für $t \geq 0$. N zählt hier nur noch nicht zerfallene Mutterkerne, nicht sämtliche Kerne im Behälter. Die entstandenen Kerne können selbst radioaktiv sein: Die Gesamtaktivität einer Kette verlangt dann weitere Gleichungen. Die einfache Beziehung beschreibt nicht universell alle Gemische.

Die Aktivität $A(t)$ des Mutterradionuklids ist die mittlere Zahl der Zerfälle pro Zeit: $A(t) = \lambda N(t)$. Sie wird in Becquerel angegeben, mit $1\ Bq = 1\ s^{-1}$. Für A in Bq muss λ daher in s^{-1} ausgedrückt sein. Aktivität ist keine von einer Person empfangene Dosis: Strahlungsarten, Exposition und Geometrie verlangen weitere Angaben. Keine Rechnung dieser Vertiefung bestimmt Handhabungsanweisungen, eine Sicherheitsgrenze oder eine klinische Entscheidung.

Die Beziehung N(t_1/2) = N0/2 liefert exp(−λt_1/2) = 1/2. Logarithmieren ergibt t_1/2 = ln(2)/λ. Damit lässt sich N(t) = N0 × 2^(−t/t_1/2) schreiben. Nach zwei Halbwertszeiten bleibt N0/4, nach drei N0/8. Jedes Intervall entfernt die Hälfte des Restbestands, nicht konstant die Hälfte von N0. Die Kurvensteigung wird im Betrag daher kleiner, anders als bei einer linearen Abnahme.

Eigenständige fiktive Aufgabe. Eine Mutterpopulation wird durch N0 = 2,0 × 10^{12} und eine Halbwertszeit von 8,0 h modelliert. Berechnen Sie λ in SI-Einheiten, N nach 24 h und die anfängliche sowie abschließende Mutteraktivität. Lösung: 8,0 h = 28 800 s, also λ ≈ 2,41 × 10^{-5} s^{-1}. Nach drei Halbwertszeiten ist N = 2,5 × 10^{11}. Die Anfangsaktivität beträgt etwa 4,81 × 10^{7} Bq; nach 24 h beträgt sie etwa 6,02 × 10^{6} Bq, ein Achtel. Die Zahlen beschreiben nur das angegebene Modell und sind mit keinem herzustellenden oder aufzubewahrenden Objekt verbunden.

Denkaufgabe. Bestimmen Sie, wann die mittlere Population unter 1 % von N0 fällt. Die Bedingung 2^(−t/t_1/2) < 0,01 liefert t > [ln(100)/ln(2)]t_1/2, also etwa 6,64 Halbwertszeiten. Bei den vorherigen Daten wird die Schwelle nach etwa 53,2 h überschritten. Nach sieben Halbwertszeiten beträgt der Anteil 1/128, etwa 0,781 %. Ein kleiner Anteil bedeutet kein vollständiges Verschwinden und ist keine Sicherheitsgrenze. Das kontinuierliche Modell liefert einen Mittelwert: Bei wenigen verbleibenden Kernen werden individuelle Schwankungen wichtig, die die glatte Kurve nicht darstellt.

Wissenschaftliche Quellen, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: CEA, Definition und radioaktiver Zerfall, https://www.cea.fr/comprendre/pages/radioactivite/radioactivite.aspx?numero=1&type=chapitre ; von ASNR bereitgestelltes Lehrdokument, Abschnitt 1.2.7, Beziehungen zu Zerfall und Aktivität, https://recherche-expertise.asnr.fr/sites/default/files/documents/professionnels_sante/documentation/syllabus_chapitre_1.pdf. Herleitungen und beide Aufgaben sind eigenständige Ausarbeitungen von LFDP. Kein experimentelles

Verfahren, Dosiswert oder Behandlungshinweis wird übernommen.

10. Eine Zusammenfassung zum Erklären statt Aufsagen

Die Photonenenergie hängt von der Frequenz ab, die Strahlleistung zusätzlich von der Photonenzahl. Ein Energieniveauschema erlaubt die Berechnung von Energiedifferenzen; die Möglichkeit eines Übergangs hängt nicht allein von dieser Differenz ab. Der elementare Photoeffekt verlangt den Vergleich von Einzelenergie und Austrittsarbeit. Eine photovoltaische Bilanz vergleicht Leistungen an derselben Grenze und unter denselben Bedingungen.

Beginnen Sie eine Lösung mit der Benennung der gesuchten Energie und ihrer Einheit. Geben Sie dann das Modell an: monochromatisches Photon, vorgegebener Übergang, Einzelphotonen-Austritt oder makroskopische Umwandlung. Rechnen Sie die Wellenlänge um, behalten Sie nahe einer Schwelle die erforderlichen Stellen bei und prüfen Sie anschließend die Richtung des Ergebnisses. Eine kleinere Wellenlänge erhöht die Einzelenergie. Eine höhere Leistung bei fester Frequenz kann die Photonenrate erhöhen. Diese begrifflichen Kontrollen verhindern viele Rechenfehler.

Rahmenquellen und Konstanten

Französischer Schwerpunktlehrplan Physik-Chemie der Abschlussklasse, Bereich Photonenenergie und Photoeffekt; Erörterung und Aufgaben oben sind eigenständige Texte, keine Übernahme des Lehrplans: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm

NIST, CODATA-2022-Tabelle physikalischer Konstanten, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 zu h, c_0, e und m_e gelesen: https://physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt

Kapitel 12 - Eine physikalische Lösung aufbauen, prüfen und darstellen

Historischer Bezug - 2018-2019: Definieren bedeutet nicht fehlerfrei messen

Die 2018 von der CGPM angenommene Resolution legte die Zahlenwerte von sieben Konstanten zur Definition des überarbeiteten SI fest, wirksam seit dem 20. Mai 2019. Das BIPM nennt insbesondere Planck-Konstante, Elementarladung und Boltzmann-Konstante. Dieser institutionelle Bezug unterscheidet einen definitionsgemäß exakten Wert von seiner experimentellen Realisierung. Eine Waage, ein Sensor oder eine Methode bleibt Unsicherheiten unterworfen. Fragen Sie bei einem Ergebnis daher, ob die Unsicherheit die definierte Konstante, die durchgeführte Messung oder die Näherungen Ihres Modells betrifft; diese drei Ebenen ersetzen einander nicht.

Quelle des historischen Sachverhalts, für die französische Fassung am 11. Oktober 2026 gelesen: BIPM, Resolution 1 der 26. CGPM, https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-1. Eigenständige didaktische Einordnung von LFDP, ohne wörtliches Zitat oder übernommene Abbildung.

1. Eine Physikfrage ist keine Datensammlung

Eine Aufgabenstellung kann Beschreibung, Diagramm, Messungen, Bezugswerte und Hintergrundangaben enthalten. Diese Elemente haben nicht alle denselben Status. Zuerst wird die Frage als gesuchte Größe oder zu erörternde Aussage neu formuliert. „Ist das Ergebnis mit dem Modell vereinbar?“ verlangt mehr als eine Zahlenrechnung. „Welches Gerät ist am effizientesten?“ verlangt die Angabe des Effizienzkriteriums und der Vergleichsbedingungen.

Die Arbeit beginnt deshalb vor der Formelwahl. Bestimmen Sie System, untersuchten Zeitraum, vom Modell erlaubte Austausche und tatsächlich verfügbare Größen. Masse und Höhe können eine Energiebilanz nahelegen; ausdrücklich genannte Reibung verhindert jedoch den sofortigen Schluss auf Erhaltung der mechanischen Energie. Widerstand und Kondensator legen einen RC-Verlauf nahe; Anfangszustand und Verbindungen müssen jedoch bekannt sein, um die Lösung zu bestimmen.

Eine wirksame Methode sind zwei Sätze: „Ich suche …“ und „Ich modelliere …“. Der erste verhindert, eine benachbarte Frage zu lösen; der zweite macht die Annahmen sichtbar. Die Sätze können in einer Antwort kurz sein. Sie dienen nicht als schmückende Einleitung, sondern legen fest, was die Lösung leisten soll.

Die Idealmodelle dieses Leitfadens erlauben keinen selbstständigen Bau gefährlicher Geräte. Eine Kraft-, Spannungs-, Temperatur- oder Energierechnung ist weder Sicherheitsverfahren noch technische Zertifizierung. Insbesondere elektrische Versuche, intensive Lichtquellen und Drucksysteme verlangen passende Betreuung. Die Aufgaben verwenden klar definierte theoretische Situationen.

2. Ein Gesetz mit begründetem Gültigkeitsbereich wählen

Zwei Ansätze können dieselbe Aufgabe mit unterschiedlichem Aufwand lösen. Um den Geschwindigkeitsbetrag nach einem widerstandsfreien Fall zu bestimmen, ist der Arbeit-Energie-Satz oft schneller als die zeitliche Integration der Dynamik. Für die Ankunftszeit genügt Energie allein nicht: Eine Zeitbeziehung wird benötigt. Für die Normalkraft bei einer Kreisbewegung ist die Projektion von Newtons zweitem Gesetz direkter als eine einfache Energiebilanz.

Die Wahl lautet deshalb nicht nur „diese Formel steht in diesem Kapitel“. Fragen Sie, welche Unbekannten das Gesetz verbindet und welche es hinzufügt. Eine Beziehung mit unbekannter Kontaktkraft kann eine Geschwindigkeitsrechnung erschweren, wenn deren Arbeit im Modell null ist. Umgekehrt verhindert es die Antwort auf eine Kraftfrage, die Kontaktkraft durch eine Energiebilanz vorschnell auszublenden.

Unterscheiden Sie außerdem ein Grundgesetz von einer Material- oder Bauteilbeziehung. Die Energieerhaltung hängt nicht von einer vollkommen linearen Feder ab. $F = -k\,x$ setzt dagegen einen Verformungsbereich und ein genaues Modell voraus. Ebenso bleibt eine Ladungsbilanz sinnvoll, wenn ein Zweipol nicht dem ohmschen Gesetz folgt; seine Strom-Spannungs-Beziehung muss dann passend ersetzt werden.

Bei einem mündlichen Vortrag ist der Vergleich zweier möglicher Wege häufig lehrreich. Erklären Sie, warum einer unmittelbar die gewünschte Größe liefert, und verwenden Sie den anderen, wo möglich, als unabhängige Kontrolle. Eine Prüfung mit anderer Methode hat mehr Wert als die Wiederholung derselben Rechnung mit umgeordneten Zahlen.

3. Ein vollständiger Fall: horizontaler Wurf ohne Luftwiderstand

Ein fiktiver Körper verlässt eine Plattform horizontal, 5,0 m über ebenem Boden, mit dem Geschwindigkeitsbetrag 4,0 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. Wir nehmen zur Vereinfachung $g = 10\ \mathrm{m\cdot s^{-2}}$ und vernachlässigen die Luft. Das Koordinatensystem hat eine horizontale Achse in Bewegungsrichtung und eine vertikale Achse nach oben; der Ursprung liegt am Startpunkt. Die vertikale Anfangsgeschwindigkeit ist null.

Die Gleichungen lauten x(t) = 4 t und y(t) = −5 t². Der Boden entspricht y = −5 m. Die positive Ankunftszeit beträgt deshalb 1,0 s, die horizontale Entfernung anschließend 4,0 m. Die Ankunftsgeschwindigkeit hat die Komponenten 4,0 und −10 m·s⁻¹. Ihr Betrag ist √116, etwa 10,8 m·s⁻¹, nicht die Summe 14 m·s⁻¹. Vektor und Betrag werden nicht auf dieselbe Weise berechnet.

Die Energiebilanz liefert eine Kontrolle: v² = v₀² + 2 g h = 16 + 100 = 116 m²·s⁻². Sie bestimmt den Geschwindigkeitsbetrag wieder, ohne unmittelbar die Ankunftszeit zu liefern. Die Übereinstimmung bestätigt die Rechnungen im Modell, beweist aber nicht, dass Luftwiderstand bei jedem realen Körper vernachlässigbar ist. Ein Blatt Papier und eine Kugel können sich trotz derselben Höhe unterschiedlich verhalten.

Das horizontale Ergebnis ist bei konstantem g linear im Anfangsgeschwindigkeitsbetrag und proportional zu √h: x_arrival = v₀ √(2 h/g). Eine Verdopplung der Höhe multipliziert die Reichweite mit √2, nicht mit zwei. Diese Abhängigkeit ist aufschlussreicher als ein Einzelwert. Sie erkennt auch eine falsche Formel, beispielsweise eine Reichweite proportional zu h, obwohl die Fallzeit von √h abhängen sollte.

4. Ein konkurrierendes Modell: Fall mit linearem Widerstand

Zur Veranschaulichung eines anderen Bereichs wählen wir nun eine vertikale Achse nach unten und die Widerstandskraft −b v mit positivem b. Das ist ein Modell linearen Widerstands und keine universelle Beschreibung von Luftwiderstand. In manchen Bereichen wären quadratische oder komplexere Abhängigkeiten passender. Stellen Sie die Rechnung als Modellvergleich dar, nicht als unter allen Bedingungen gültige Korrektur.

Die Dynamik liefert m v' = m g − b v. Mit τ = m/b und v_lim = m g/b ergibt sich bei v(0) = 0: v(t) = v_lim (1 − e^(−t/τ)). Der

Geschwindigkeitsbetrag wächst, nähert sich aber einem Grenzwert. Die Beschleunigung ist g e^(−t/τ), positiv und abnehmend. Anfangs, bei t klein gegenüber τ, liefert die Exponentialnäherung v ≈ g t wie beim Fall ohne Widerstand.

Die vom Start aus gemessene Position beträgt z(t) = v_lim [t − τ (1 − e^(−t/τ))]. Ableiten ergibt wieder v(t), und z(0) = 0. Für kurze Zeiten liefern die Entwicklung der Geschwindigkeit erster Ordnung und anschließende Integration z ≈ g t²/2. Anfangsbedingungen und Grenzbereich zu prüfen ist unverzichtbar, wenn ein Exponentialausdruck mehrere Vorzeichen enthält.

Wir setzen τ = 2,0 s und g = 10 m·s⁻². Der fiktive Grenzgeschwindigkeitsbetrag ist 20 m·s⁻¹. Bei t = 2,0 s beträgt der Geschwindigkeitsbetrag etwa 12,6 m·s⁻¹ gegenüber 20 m·s⁻¹ ohne Widerstand. Die zurückgelegte Strecke beträgt etwa 14,7 m gegenüber 20 m im widerstandsfreien Modell. Der Widerstand verändert also sowohl die Geschwindigkeit als auch den Zusammenhang zwischen Zeit und Strecke.

Eine einzelne Messung kann zur Wahl zwischen Modellen nicht ausreichen. Suchen Sie mehrere Werte im Zeitverlauf, vergleichen Sie Abweichungen mit der experimentellen Genauigkeit und untersuchen Sie die Struktur der Residuen. Eine abflachende Kurve legt Widerstand nahe, könnte aber auch aus Gerätesättigung entstehen. Die physikalische Deutung muss von einer Prüfung des Messgeräts begleitet werden.

5. Vom Diagramm zum Parameter gelangen

Ein Diagramm stellt Daten mit Maßstab, Einheit und manchmal einer Transformation dar. Die Steigung von y gegen x hat die Einheit von y geteilt durch die Einheit von x. Geschwindigkeit in $m \cdot s^{-1}$ gegen Zeit in Sekunden ergibt eine Beschleunigungssteigung in $m \cdot s^{-2}$. Bei einer horizontalen Achse in Millisekunden muss die abgelesene Steigung vor dem Vergleich mit einem SI-Wert umgerechnet werden.

Für eine ideale RC-Entladung gilt u(t) = u₀ e^(−t/τ). Bleiben die Spannungen der verwendeten Daten positiv, lässt sich ln[u(t)/u₀] = −t/τ schreiben. Der Quotient im Logarithmus ist dimensionslos. Diesen Logarithmus gegen die Zeit aufzutragen ergibt eine Gerade mit der Steigung −1/τ. ln u ohne Angabe einer Bezugsspannung verdeckt diese Dimensionsanforderung, auch wenn gewisse numerische Verfahren den Bezug unausgesprochen lassen.

Angenommen, u(0) = 6,0 V und u(2,0 s) = 3,0 V. Das Modell liefert τ = 2/ln 2, etwa 2,89 s. Es sagt danach u(4,0 s) = 1,5 V voraus. Dieser dritte Wert ist eine überprüfbare Vorhersage, sofern er nicht bereits zur Bestimmung von τ verwendet wurde. Ergibt die Messung bei kleiner Unsicherheit 1,9 V, runden Sie nicht einfach großzügiger, um das Modell zu retten: Prüfen Sie Annahmen oder Daten.

Die Anpassung kann einen freien Achsenabschnitt zulassen, um einen versetzten Auslösezeitpunkt zu berücksichtigen. Erzwingen Sie die Gerade nicht nur deshalb durch den Ursprung, weil eine Idealformel dies nahelegt, ohne die Übereinstimmung von Zeitursprung, Bezugsspannung und Verfahren zu prüfen. Eine bei der Verarbeitung aufgezwungene Annahme kann eine scheinbare Bestätigung erzeugen.

6. Unsicherheiten, Streuung und Vereinbarkeit

Ein Messwert ist keine exakte Kenntnis einer Größe. Wiederholte Messungen können die Streuung beschreiben; Geräteauflösung, Kalibrierung, Bedingungen und Methode tragen ebenfalls zur Unsicherheit bei. Eine eng gruppierte Serie schließt einen gemeinsamen systematischen Fehler nicht aus. Zehn Ablesungen mit einem Lineal mit versetztem Ursprung können reproduzierbar und trotzdem systematisch zu groß sein.

Zwei Ergebnisse x_1 und x_2 können mit ihren Standardunsicherheiten u_1 und u_2 verglichen werden. Bei unabhängigen Beiträgen beträgt die Standardunsicherheit ihrer Differenz $\sqrt{(u_1^2 + u_2^2)}$. Das Verhältnis $|x_1 - x_2|/\sqrt{(u_1^2 + u_2^2)}$ quantifiziert dann die Abweichung relativ zu dieser Skala. Es hilft, die Vereinbarkeit unter den gewählten Annahmen zu erörtern, ersetzt aber weder die Untersuchung systematischer Fehler noch eine vorher festgelegte Entscheidungsregel.

Betrachten wir 2,00 s mit $u_1 = 0{,}03$ s und 2,08 s mit $u_2 = 0{,}04$ s. Die Differenz beträgt 0,08 s, ihre Standardunsicherheit 0,05 s; das Verhältnis ist 1,6. Wir können sagen, die Abweichung sei das 1,6-Fache dieser kombinierten Unsicherheit. Die Zahl allein bestimmt keine exakte Wahrscheinlichkeit, dass das Modell wahr ist. Die Schlussfolgerung hängt insbesondere von der Bedeutung der Unsicherheiten und dem gewählten statistischen Rahmen ab.

Korrelation verändert die Rechnung. Verwenden beide Ergebnisse dasselbe Gerät und dieselbe Kalibrierung, kann ein Fehleranteil gemeinsam sein. Dieser Beitrag kann sich in einer Differenz aufheben oder in einer Summe addieren. Unabhängige quadratische Kombination ist deshalb keine automatisch auf jede Situation anzuwendende Formel. Folgen Sie in einer Aufgabe den angegebenen Annahmen; fragen Sie in einer realen Untersuchung nach der Herkunft der Unsicherheiten.

7. Dimensionen und Grenzverhalten prüfen

Eine Gleichung darf nur Größen derselben Dimension addieren. In m g h + m v²/2 sind beide Terme Energien. In einem vorgeschlagenen m g + m v²/2 würde eine Kraft zu einer Energie addiert; der Fehler ist ohne Zahlenwerte erkennbar. Die Dimensionsprüfung beweist keine Formel, weil verschiedene Ausdrücke dieselbe Dimension besitzen können; sie schließt trotzdem viele falsche Möglichkeiten aus.

Die Argumente einer Exponential-, Logarithmus- oder trigonometrischen Funktion müssen in üblichen Modellen dimensionslos sein. In e^(−t/τ) erfüllt das Verhältnis zweier Zeiten diese Bedingung. In cos(2π f t) ist Frequenz mal Zeit ebenfalls dimensionslos. e^(−t) ist nur vollständig, wenn eine Zeitskala oder Einheitenkonvention ausdrücklich festgelegt wurde.

Grenzwerte liefern einen zweiten Filter. Steigt der Strömungswiderstand, sollte der Volumenstrom in einem Modell mit festem Druckunterschied nicht wachsen. Geht beim RC-Laden die Zeit gegen null, muss die Spannung wieder ihren Anfangswert liefern. Wächst bei einer idealen isotropen Quelle der Beobachtungsabstand, muss die empfangene Intensität abnehmen. Diese einfachen Argumente setzen gleichbleibende Bedingungen voraus; andernfalls verliert der Vergleich seinen Sinn.

Die Prüfung muss auch Extremwerte betrachten, die das Modell ungültig machen. Bei einer Beziehung unter Kleinwinkelannahme ist ein Winkel nahe π/2 kein sinnvoller physikalischer Test der Näherung. Prüfen Sie zunächst, ob der untersuchte Grenzbereich noch zum angegebenen Gültigkeitsbereich gehört. Ein Scheitern außerhalb dieses Bereichs informiert über die Reichweite des Modells, nicht zwingend über seine Genauigkeit innerhalb des Bereichs.

8. Dokumente untersuchen und die Belege sichtbar halten

Eine Dokumentensynthese muss unterscheiden, was eine Quelle sagt und was wir daraus folgern. Eine unter bestimmten Bedingungen gemessene Wirkungsgradtabelle garantiert nicht denselben Wirkungsgrad in jedem Klima. Ein Nennwert ist kein garantierter Mindestwert. Ein historischer Auszug kann die Entwicklung eines Begriffs erläutern, ohne die Daten einer heutigen Rechnung zu liefern.

Prüfen Sie zum Vergleich zweier Dokumente Daten, Systeme, Einheiten, Bilanzgrenzen und Unsicherheiten. Verschiedene Zahlen können vereinbar sein, wenn sie nicht exakt dieselbe Größe messen. Umgekehrt können gleiche Zahlen ohne Zusammenhang sein, wenn sie verschiedene Bedingungen betreffen. Die erste Frage lautet deshalb „Was wird gemessen?“, vor „Was ist größer?“.

Ein starkes Argument enthält Aussage, Beleg und Grenze. Beispielsweise: „Im isotropen Modell ohne Absorption teilt die Verdopplung des Abstands die Intensität durch vier, weil sie sich über eine zum Abstandsquadrat proportionale Fläche verteilt. Diese Vorhersage beschreibt nicht automatisch eine reflektierende Umgebung.“ Eine genaue Grenze stärkt das Argument; sie hebt es nicht auf.

Bereiten Sie für einen mündlichen Vortrag eine einfache Skizze, eine zentrale Gleichung und ein reproduzierbares Zahlenbeispiel vor. Bereiten Sie auch eine kritische Frage vor: Warum diese Wechselwirkung vernachlässigen, dieses Bezugssystem wählen oder diesen Maßstab beibehalten? Eine erläuterte Antwort zeigt tieferes Verständnis als eine lange aufgesagte Rechnung ohne die Fähigkeit, sie zu begründen.

9. Verknüpfende Aufgaben mit Lösungen

Aufgabe A. Eine fiktive Masse von 0,40 kg bewegt sich reibungsfrei um eine Höhe von 1,8 m nach unten und komprimiert anschließend eine horizontale Feder mit der Federkonstante 160 N·m⁻¹. Bei g = 10 m·s⁻² beträgt die verfügbare Energie 7,2 J. Bei maximaler Kompression ist die Geschwindigkeit null und k x²/2 = 7,2, also x = 0,30 m. Dies setzt voraus, dass sich die Höhe während der Kompression nicht mehr ändert und die gesamte berücksichtigte Energie zu elastischer Energie wird.

Werden vor der Kompression 1,8 J dissipiert, beträgt die maximale elastische Energie nur 5,4 J. Es folgt x = √(10,8/160), etwa 0,260 m. Die Kompression nimmt nicht im selben Verhältnis wie die Energie ab, weil sie quadriert vorkommt. Das erklärt, warum eine zu intuitive Proportionalitätskontrolle falsch sein könnte.

Aufgabe B. Ein Sensor empfängt zwei unabhängige Schallquellen mit jeweils 4,0 × 10⁻⁶ W·m⁻² Intensität. Bei I₀ = 10⁻¹² W·m⁻² beträgt jeder Pegel etwa 66,0 dB. Die Gesamtintensität ist 8,0 × 10⁻⁶ W·m⁻² und der Pegel etwa 69,0 dB. Die Pegel zu 132 dB zu addieren wäre falsch. Unter dieser Annahme addieren sich die Intensitäten; die logarithmischen Pegel werden anschließend berechnet.

Aufgabe C. Ein Strahl mit 450 nm trägt die Leistung 1,0 mW. Ein Gerät wandelt nur 20 % der empfangenen Photonen in ein Nutzsignal um, in einem Modell mit einem Ereignis pro Photon. Die Einzelenergie beträgt etwa 4,41 × 10⁻¹⁹ J, die einfallende Rate 2,27 × 10¹⁵ s⁻¹ und die nutzbare Rate 4,53 × 10¹⁴ s⁻¹. Der Zählwirkungsgrad ist nicht automatisch der Energiewirkungsgrad des Geräts: Dafür müssten Energie des erzeugten Signals und zugehörige Verluste bekannt sein.

Aufgabe D. Zwei Modelle sagen die Anfangsspannung 8 V voraus: das erste u = 8 e^(−t/2), das zweite u = 8 − 2 t. Bei t = 0,5 s

ergeben sich etwa 6,23 V und 7,0 V. Bei t = 4 s liefert das zweite null und wird anschließend negativ, im Widerspruch zu einem passiven Entladungsmodell mit positiver Spannung. Eine lineare Näherung kann örtlich gelten; ihre unbegrenzte Fortsetzung erzeugt eine falsche Vorhersage.

10. Eine Wiederholungsmethode, die den Gedankengang rekonstruiert

Ordnen Sie Fehler nach einer Aufgabe ihrer Herkunft zu: Frageverständnis, System und Annahmen, Gesetzeswahl, Projektion oder Vorzeichen, Algebra, Umrechnung, Rechnung, Deutung. Diese Einteilung hilft, eine genaue Maßnahme zu wählen. Zehn Zahlenanwendungen zu wiederholen beseitigt keine Verwechslung von Beschleunigung und Geschwindigkeit; dann müssen Diagramme und Definitionen bearbeitet werden.

Wechseln Sie beim Wiederholen zwischen ähnlichen Aufgaben und neuen Situationen. Die ersten festigen eine Technik; die zweiten prüfen, ob Sie erkennen, wann sie gilt. Ein Gegenbeispiel zu erklären ist besonders nützlich: Warum bleibt die mechanische Energie in diesem System nicht erhalten, warum ist dieses Strömungsgesetz ungeeignet, warum kann ein Logarithmus diese Größe nicht ohne Bezug aufnehmen?

Eine Endlösung muss ohne Erraten einer verborgenen Konvention verständlich sein. Sie benennt Symbole, nennt Annahmen, verbindet Beziehungen und antwortet in der verlangten Einheit. Sie verspricht nicht mehr, als die Daten erlauben. Diese Anforderung verbindet den Leitfaden: Rechnen ist ein wirksames Werkzeug, wenn es mit Verständnis von System, Modell und Belegen einhergeht.

Rahmenquellen

Französischer Schwerpunktlehrplan Physik-Chemie der Abschlussklasse, Rahmen für experimentelle, Modellierungs- und Kommunikationskompetenzen; eigenständige Fälle und Aufgaben von LFDP: https://www.education.gouv.fr/bo/19/Special8/MENE1921249A.htm

Broschüre des Internationalen Einheitensystems, BIPM, für Dimensionen und Einheitenkonventionen: https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/

Anhänge - Themenübergreifende Aufgaben und begründete Antworten

A. g mit einem Pendelmodell messen: eine methodische Vertiefung

Als Vertiefung gilt im Modell eines einfachen Pendels bei kleinen Schwingungen die Periodendauer $T = 2\pi\sqrt{(L/g)}$. Der Faden wird als masselos angenommen, die bewegte Masse als Punkt behandelt, Reibung vernachlässigt und die Amplitude als hinreichend klein vorausgesetzt. Dieses Modell definiert nicht universell jedes Pendel. Ein ausgedehnter Körper oder eine große Amplitude können einen anderen Ausdruck verlangen.

Eine fiktive Messung liefert $L = 0{,}640$ m und $T = 1{,}60$ s. Nach der gesuchten Größe aufzulösen ergibt $g = 4\pi^2 L/T^2$, also ungefähr 9,87 $m \cdot s^{-2}$. Die Dimensionsanalyse liefert erwartungsgemäß m/s^2. Eine Verdopplung von T bei festem L würde das berechnete g durch vier teilen; dies beschreibt die Abhängigkeit der Abschätzung von der Messung, keine Möglichkeit, durch eine Messänderung die Schwerkraft zu ändern.

Für eine erste Unsicherheitsnäherung mit unabhängigen Beiträgen werden $u(L) = 0{,}005$ m und $u(T) = 0{,}02$ s verwendet. Die kombinierte relative Unsicherheit beträgt $\sqrt{[(u(L)/L)^2 + (2u(T)/T)^2]}$, etwa 0,0262. Daraus folgt $u(g) \approx 0{,}26$ $m \cdot s^{-2}$. Der Faktor zwei vor der relativen Unsicherheit von T folgt aus der Potenz T^{-2}. Ihn zu vergessen würde diesen Beitrag unterschätzen.

Der Vergleich mit einem Bezugswert von 9,81 $m \cdot s^{-2}$ verlangt nicht, beide Werte für gleich zu erklären. Die Differenz beträgt ungefähr 0,06 $m \cdot s^{-2}$ und ist klein gegenüber der in diesem Beispiel angegebenen Standardunsicherheit. Diese Vereinbarkeit beweist nicht, dass kein systematischer Fehler vorliegt. Zu prüfen wären

die Definition von L, die Zeitmessung mehrerer Perioden, die Amplitude und die Schwingungsbedingungen. Verbesserung heißt, auf eine erkannte Ursache einzuwirken, nicht Nachkommastellen hinzuzufügen.

B. Dichte durch scheinbare Wägung bestimmen

Ein fiktiver Festkörper mit der Masse 0,240 kg ist vollständig in eine Flüssigkeit mit der Dichte 1 000 kg·m^{-3} eingetaucht. Ein Gerät misst eine vertikale Zugkraft von 1,60 N, wenn der Körper ruht und das Gefäß nicht berührt. Bei g = 10 m·s^{-2} beträgt seine Gewichtskraft 2,40 N. Im Gleichgewicht müssen Zugkraft und Auftrieb zusammen die Gewichtskraft ausgleichen: Der Auftrieb beträgt daher 0,80 N.

Die archimedische Beziehung ergibt das eingetauchte Volumen V = 0,80/(1 000 × 10) = 8,0 × 10^{-5} m³ oder 80 cm³. Weil der Festkörper vollständig eingetaucht ist, entspricht dieser Wert im Modell seinem Volumen. Seine Dichte ist 0,240/(8,0 × 10^{-5}) = 3 000 kg·m^{-3}. Sie übersteigt die Flüssigkeitsdichte, passend zur nötigen Zugkraft, die ihn an Ort und Stelle hält.

Wäre der Körper nur teilweise eingetaucht, ergäbe dieselbe Rechnung nur das Volumen seines eingetauchten Teils. Haftete eine Luftblase an ihm, übte der Faden eine zusätzliche Kraft aus oder berührte der Festkörper den Boden, würde sich die Kräftebilanz ändern. Die verwendete Formel ist nicht falsch; ihre eingesetzten Größen würden nicht mehr zum angegebenen Modell gehören.

Die Aufgabe unterscheidet drei Schritte: Ein Gleichgewichtsgesetz liefert eine Kraft, eine Auftriebsbeziehung ein Volumen und eine Definition eine Dichte. Diese Schritte zu vermischen kann eine Annahme verdecken. Sie getrennt aufzuschreiben erlaubt die

Prüfung jedes Schritts und eine mündliche Erklärung des Ergebnisses.

C. Eine elektrische Angabe bestimmt noch keine Energie

Ein fiktives Gerät liefert eine konstante Spannung von 4,0 V bei einer Stromstärke von 0,50 A während drei Minuten. Die elektrische Leistung beträgt 2,0 W und die übertragene Energie 360 J, denn drei Minuten entsprechen 180 Sekunden. Die übertragene Ladung beträgt 90 C. Energie = Spannung × Ladung ergibt bei diesen Bedingungen konstanter Spannung wieder 360 J.

Nun bleibt die Spannung konstant, während der Strom gemäß i(t) = 0,50 e^(−t/60) abnimmt, mit t in Sekunden. Die Energie über dieselben 180 Sekunden ist das Integral von 4 i(t), also 120(1 − e^{-3}) J, ungefähr 114 J. Anfangsleistung mal Dauer ergäbe 360 J und würde die Übertragung erheblich überschätzen. Anfangsleistung ist nicht mittlere Leistung.

Die mittlere Leistung über diese Dauer beträgt ungefähr 0,633 W. Dieser Mittelwert bedeutet nicht, dass das Gerät zu jedem Zeitpunkt tatsächlich diese Leistung lieferte. Er ergibt über das untersuchte Intervall dieselbe Gesamtenergiebilanz. Das Integral beschreibt die Ansammlung, die Funktion den örtlichen zeitlichen Verlauf.

Vor der Verwendung kommerzieller Angaben zu Batterie oder Ladegerät wären Leistung, Energie, Nennspannung, Ladungskapazität und Betriebsbedingungen zu unterscheiden. Die Aufgabe belegt keine Betriebsdauer eines realen Geräts. Sie lehrt, die nötigen Informationen zu verlangen, statt aus einem Einzelwert ein Nutzungsversprechen zu machen.

D. Ein inverses Problem kann mehrere Erklärungen zulassen

Die Schallintensität nimmt ab, wenn sich der Empfänger entfernt. Die Beobachtung kann zu geometrischer Verteilung über immer größere Flächen, Absorption im Medium, Quellenausrichtung oder einer Kombination dieser Effekte passen. Zwei bekannte Werte reichen nicht immer zur getrennten Bestimmung der Beiträge.

Im isotropen Modell ohne Absorption gilt $I(r) = P/(4\pi r^2)$. Beträgt die Intensität bei zwei Metern $2{,}0 \times 10^{-6}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$, lautet die Vorhersage bei vier Metern $5{,}0 \times 10^{-7}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$. Eine Messung dieses Werts ist mit dem Modell vereinbar; ein komplexeres Modell könnte sie bei bestimmten Parametern ebenfalls wiedergeben. Vereinbarkeit macht die Erklärung nicht eindeutig.

Zur Unterscheidung der Modelle verwenden wir mehrere Beobachtungsabstände, halten die anderen Bedingungen konstant, untersuchen Richtungen und bewerten Unsicherheiten. Wir suchen eine Vorhersage, in der sich die Hypothesen unterscheiden. Eine hilfreiche neue Beobachtung ist nicht bloß eine Wiederholung am selben Ort; sie kann zur Unterscheidung der vorgeschlagenen Mechanismen gewählt werden.

Diese Überlegung gilt auch für eine Abkühlkurve, eine Bahn oder ein Spektrum. Eine erfolgreiche Anpassung zeigt, dass das Modell bestimmte Daten mit bestimmten Parametern wiedergibt. Eine anspruchsvollere Prüfung kontrolliert Daten, die nicht zur Parameterwahl dienten. Die Unterscheidung verhindert, eine bloße Anpassung an schon verwendete Beobachtungen als Validierung zu bezeichnen.

E. Zwei Abschätzungen der Lichtenergie vergleichen

Ein fiktiver monochromatischer Strahl von 500 nm liefert 0,50 mJ. Ein Weg verwendet die bekannte mittlere Leistung über die Dauer; ein zweiter zählt eine geschätzte Photonenzahl. Die Photonenenergie beträgt ungefähr $3{,}97 \times 10^{-19}$ J. Die mit 0,50 mJ verbundene Zahl ist daher ungefähr $1{,}26 \times 10^{15}$.

Ergibt die für Verluste korrigierte Zählung $1{,}20 \times 10^{15}$ Photonen, beträgt ihre Energieabschätzung ungefähr 0,477 mJ. Die Werte sind nicht identisch. Vor dem Schluss auf einen Widerspruch würden Unsicherheiten der Zählung und Leistungsmessung, monochromatische Beschaffenheit der Quelle und Definition der Dauer geprüft. Ohne Unsicherheitsangaben bestimmt die Rechnung allein nicht ihre Vereinbarkeit.

Eine Detektionskorrektur muss mit einer unter den betrachteten Bedingungen bekannten Effizienz verbunden sein. Die gemessene Zahl willkürlich durch einen Prozentsatz zu teilen, der die gewünschte Energie erzeugt, wäre zirkulär. Es muss erklärt werden können, wie die Effizienz bestimmt wurde und ob sie von Wellenlänge oder Fluss abhängt.

Die Aufgabe verbindet eine makroskopische Energie mit einer mikroskopischen Beschreibung. Sie verwechselt Photonenzahl, Leistung und Einzelenergie nicht. Dieselbe Gesamtenergie kann auf mehr energieärmere oder weniger energiereichere Photonen verteilt sein; das Spektrum bestimmt diese Verteilung.

F. Kritik lesen und eine Antwort verbessern

Erste Antwort: „Die Geschwindigkeit ist konstant, weil die Resultierende null ist.“ Der Satz ist richtig, wenn er sich auf den Geschwindigkeitsvektor in einem Inertialsystem bezieht und die Modellbedingungen erfüllt sind. Ohne Angabe des Bezugssystems im Zusammenhang ist die Begründung unvollständig. Bezieht er sich nur auf den Geschwindigkeitsbetrag, kann er bei Kreisbewegung missbraucht werden, wo die Resultierende trotz konstanten Betrags ungleich null ist.

Verbesserte Antwort: „Im gewählten Inertialsystem ist die resultierende Kraft null; Newtons zweites Gesetz liefert deshalb die Beschleunigung null und einen konstanten Geschwindigkeitsvektor.“ Der Satz ist etwas länger, aber jede Präzisierung hat eine Aufgabe. Anschließend sämtliche Kapitelgleichungen hinzuzufügen ergäbe nicht zwingend eine bessere Antwort.

Erste Antwort: „Der Wirkungsgrad beträgt 80 %, also verschwinden 20 % der Energie.“ Der zweite Teil ist falsch. Nach dem gewählten Kriterium nicht nutzbare Energie kann in anderen Formen oder auf andere Systeme übertragen werden. Eine richtige Formulierung nennt Eingangsenergie, Nutzenergie und Bilanzgrenze. Der Fehler ist nicht rechnerisch, sondern entsteht durch die Deutung der Erhaltung.

Erste Antwort: „Die Ergebnisse liegen nahe beieinander, also ist das Modell wahr.“ Die Nähe muss mit Unsicherheit und Entscheidungskriterium verglichen werden. Selbst gute Vereinbarkeit macht ein Modell nicht zur vollständigen Beschreibung. Eine begründbare Schlussfolgerung könnte lauten: „Die vorgelegten Daten zeigen nach dem angegebenen Kriterium und den Unsicherheiten keine erhebliche Abweichung.“ Diese

Einschränkung folgt aus der Beleglage, nicht aus mangelndem Vertrauen.

G. Einen mündlichen Vortrag mit einer weiterführenden Frage vorbereiten

Wählen Sie ein ausreichend begrenztes Problem, das sich ohne Verbergen seiner Annahmen erklären lässt. Eine Frage wie „Warum entsteht eine Grenzgeschwindigkeit im Fallmodell mit Reibung?“ erlaubt die Vorstellung eines Systems, einer Kraft, einer Differentialgleichung, einer Lösung und eines Vergleichs mit dem reibungsfreien Fall. Sie eröffnet auch eine Diskussion über die Wahl linearen oder quadratischen Widerstands.

Bereiten Sie eine Zeichnung mit erkennbaren Kräften und Achsen vor und anschließend eine zentrale Gleichung, deren jeder Term eine Bedeutung hat. Ein fiktives Zahlenbeispiel muss als solches bezeichnet werden. Ein Diagramm braucht Achsen und Einheiten. Der Vortrag darf nicht nahelegen, eine Simulation des Modells sei eine experimentelle Messung.

Bereiten Sie drei Fragen vor: Welches Phänomen wurde vernachlässigt, welche Beobachtung könnte dem Modell widersprechen und welche Schlussfolgerung bleibt bei einer Parameteränderung gültig? Diese Fragen helfen, die Struktur der Argumentation von ihrem Zahlenbeispiel zu unterscheiden. Sie zeigen übertragbares Verständnis statt bloßes Aufsagen.

H. Das eigene Verständnis ohne automatische Selbstnote prüfen

Versuchen Sie für ein Kapitel, einen Begriff zu definieren, eine Beziehung zu begründen, eine Rechnung zu wiederholen und einen Fall zu nennen, in dem die Beziehung nicht mehr gilt. Scheitert eine dieser Aufgaben, bestimmen Sie das Fehlende: Wortschatz, Darstellung, rechnerischer Umgang oder Annahmenverständnis. Diese Diagnose legt eine gezielte Wiederholungsaufgabe fest.

Vertrautheit beim Lesen beweist keine Beherrschung. Eine ausgearbeitete Antwort erneut zu lesen kann leicht erscheinen, weil die Schritte schon gewählt sind. Ein neues Problem zu lösen, ein Vorzeichen zu erklären oder eine falsche Antwort zu kritisieren liefert anspruchsvollere Belege. Der erforderliche Aufwand darf nicht mit der Länge der schriftlichen Antwort verwechselt werden.

Der Leitfaden bietet Lernwerkzeuge und Lösungen, aber seine Lektüre garantiert keine Prüfungsnote. Erklären Sie zur Bewertung Ihres Fortschritts eine Methode ohne Abschreiben, prüfen Sie ein Ergebnis auf einem anderen Weg und benennen Sie die Modellgrenzen. Klare Erklärung, genaue Rechnung und relevante Annahmen ergänzen einander, ohne einander zu ersetzen.